

Doktori (Ph.D.) értekezés

Radonkoncentráció dinamikájának és forrásainak vizsgálata budai-hegységi barlangokban

Nagy Hedvig Éva

ELTE TTK Környezettudományi Doktori Iskola

Környezeti Földtudomány Program

Témavezetők:

Szabó Csaba Ph.D., egyetemi docens

Dr. Horváth Ákos, egyetemi docens

Doktori Iskola vezetője: Dr. Kiss Ádám

Doktori program vezetője: Dr. Galács András

2012.

Budapest

Litoszféra Fluidum Kutató Labor

TARTALOMJEGYZÉK

Tartalomjegyzék.....	1
Ábrajegyzék	3
Táblázatjegyzék.....	7
1. Bevezetés, célkitűzés.....	9
2. A radon elméleti háttere	10
2.1. Természetes háttérsugárzás és a radon.....	10
2.2. A radon fizikai és kémiai tulajdonságai	11
2.3. Radon a környezetünkben	12
2.4. A radonprobléma története.....	14
2.5. A Radon egészségre gyakorolt hatásai	15
2.6. Radonnal kapcsolatos szabályozások Magyarországon.....	16
2.7. Kutatástörténet - radon a barlangokban	17
2.7.1. Radon a Pál-völgyi-barlangban.....	20
3. Vizsgált terület földtani háttere	22
3.1. A rózsadombi barlangok és kialakulásuk.....	26
3.2. Vizsgált barlangok.....	29
3.2.1. A Pál-völgyi-barlang története	29
3.2.2. A Pál-völgyi-barlang geológiája	30
3.2.3. A Molnár János-barlang története.....	31
3.2.4. A Molnár János-barlang geológiája	32
3.2.5. Hideg-lyuk.....	33
3.2.6. Harcsaszájú-barlang (Déry-barlang)	34
4. Mintavételezés.....	34
4.1. Mintavételezési helyszínek	34
4.1.1. Pál-völgyi-barlang.....	34
4.1.2. Molnár János-barlang.....	37
4.1.3. Hideg-lyuk, Harcsaszájú-barlangok	38
4.2. Mintavételezési módszerek	39
4.2.1. Szilárd minták	39
4.2.2. Vízminták	40
5. Vizsgálati módszerek	40
5.1. Helyszíni mérések	40
5.1.1. Meteorológiai paraméterek vizsgálata	40
5.1.2. Levegő radonkoncentrációjának vizsgálata aktív radon detektorral	41
5.1.3. Levegő radonkoncentrációjának vizsgálata passzív detektorral	42
5.1.4. Barlangi agyag pórusaiban lévő levegő radonkoncentrációjának vizsgálata	43
5.2. Laboratóriumi vizsgálatok.....	44
5.2.1. Fizikai mérések	44
5.2.2. Kőzettani vizsgálatok	46
5.3. Alapstatisztikai értékelés.....	51
6. Pál-völgyi-barlang vizsgálati eredményei.....	52
6.1. Radonkoncentráció térbeli eloszlásának vizsgálata	52
6.1.1. Radonkoncentráció térbeli eloszlásának vizsgálata aktív radon detektorral	52
6.1.2. Radonkoncentráció térbeli eloszlásának vizsgálata passzív radon detektorral	53
6.2. Hosszú távú radonkoncentráció monitorozás eredményei	57
6.2.1. Statisztikai leírás	57
6.2.2. Radonkoncentrációval párhuzamosan mért meteorológiai paraméterek eredményei	59

6.3. Radonkoncentráció forrása.....	64
6.3.1. Fizikai vizsgálatok.....	64
6.3.2. Kőzettani vizsgálatok.....	72
7. Molnár János-barlang vizsgálati eredményei.....	83
7.1. Radonkoncentráció időbeli változásának vizsgálata passzív detektorral.....	83
7.2. Radonkoncentráció időbeli változásának vizsgálata aktív detektorral.....	84
7.3. Radonkoncentráció forrása.....	87
7.3.1. Víz alatti agyagminta.....	87
7.3.2. Vízminták radontartalma.....	91
8. Hideg-lyuk és Harcsaszájú barlangok Vizsgálati Eredményei.....	92
9. Diskusszió.....	93
9.1. Külső hőmérséklet hatása a barlangi levegő radonkoncentrációjára.....	93
9.2. Barlangi radonkoncentráció napszakos periodicitása a Pál-völgyi-barlangban.....	95
9.3. Szellőzés vizsgálata a Pál-völgyi-barlangban.....	99
9.3.1. Ventillációs index bevezetése.....	99
9.3.2. Pál-völgyi-barlang szellőzési foka.....	103
9.4. A korrelációs koefficiens szezonálitása.....	105
9.5. Barlangi agyag vizsgálata.....	107
9.6. A Pál-völgyi és a Molnár János-barlang összehasonlítása a levegőjük radonkoncentrációja alapján.....	112
9.6.1. Aktív radon detektoros mérések.....	112
9.6.2. Passzív radon detektoros mérés.....	117
9.7. Barlangi vizek oldott radontartalma.....	118
10. Összefoglalás.....	120
11. Új tudományos eredmények.....	122
Kivonat.....	124
Abstract.....	126
12. Köszönetnyilvánítás.....	127
13. Irodalomjegyzék.....	129
Egyéb hivatkozások:.....	137

ÁBRAJEGYZÉK

1. ábra: Visszalökődési jelenségek az anyagokban (a kitöltött fekete kör a rádiumot, a fehér a radont jelöli).....	13
2. ábra: Az ATOMKI és a Bekey Imre Barlangkutató Csoport radonmérési pontjai az 1990-1997 közötti időszakban.....	21
3. ábra: A Hármashatár-hegy és a Rózsadomb elhelyezkedése a Budai-hegységben. Az 1-es pont a Pál-völgyi-barlangot, a 2-es a Molnár János-barlangot jelöli. (forrás: Honvéd Térképészeti Intézet. M. 1:25 000. Budapest, 1947).....	23
4. ábra: A vizsgált terület fedett földtani térképe.....	26
5. ábra: Budai-hegységi barlangok elhelyezkedése és kiterjedése (a barlang neve alatti szám a barlang 2011-ben ismert hosszát jelzi).....	29
6. ábra: A Pál-völgyi-barlang területéről készített műholdfelvétel. A fehér görbék a barlang általunk vizsgált szakaszának elhelyezkedését jelölik.	31
7. ábra: A Molnár János-barlang területéről készített műholdfelvétel. A kék görbék a barlang térképre vetített poligonját jelölik.	33
8. ábra: A Pál-völgyi-barlang vizsgált szakasza.....	35
9. ábra: A Molnár János-barlang 2007-ig feltárt szakaszainak vázlatos alaprajza. A szaggatott vonal mesterséges tárot jelez. A zöld pont a kihelyezett nyomdetektorok, a narancssárga pont az AlphaGuard radonmonitor megközelítő helyét jelöli (SURÁNYI et al., 2010 után módosítva).....	38
10. ábra: A Hideg-lyuk és Harcsaszájú-barlangokban gyűjtött agyagminák mintavételezési pontjai a Szépvölgyi-barlangrendszerben	38
11. ábra: a, Barlangi agyagos kitöltés mintavétel kézi ásóval a Pál-völgyi-barlangban b., Barlangi agyagos kitöltés mintavétel fúrással a Pál-völgyi-barlangban	39
12. ábra: A Pál-völgyi-barlangban elhelyezett FWS 20 meteorológiai állomás	41
13. ábra: A hosszú távú radonkoncentráció monitorozáshoz használt AlphaGuard radon monitor a Pál-völgyi-barlangban.....	41
14. ábra: Agyagos kitöltés pórusaiban lévő levegő radonkoncentrációjának meghatározása a Pál-völgyi-barlangban.....	44
15. ábra: Radonkoncentráció változása a 2., 3., 5., 6. mérési ponton 2010. február 26-án. A 2. mérési ponton AlphaGuard radonmonitort, a másik három ponton RAD 7 radon detektort használtunk.....	52
16. ábra: Radonkoncentráció térbeli eloszlásának vizsgálata aktív radon detektorokkal (2010.02.26).	53
17. ábra: Radonkoncentráció térbeli eloszlása a Pál-völgyi-barlangban (Raduet passzív detektorok)	54
18. ábra: A radonkoncentráció térbeli eloszlását jól bemutató átlagértékek (a 2011. február 22. és 2011. november 15. közötti időszakban) a Pál-völgyi-barlang 8 mérési pontján.....	56
19. ábra: A radonkoncentráció (AlphaGuard) értékének változása a hosszú távú mérés során	57
20. ábra: A radonkoncentráció egy éves (2009. 10.27-2010.10.27) adatsorának gyakoriság hisztogramja.....	58
21. ábra: A radonkoncentráció egy éves (2009. 10.27-2010.10.27) adatsorának box és whiskers ábrája (a vonal a mediánt jelöli (474 Bq/m^3), a pont az átlagot), Scatterplot ábrája és kumulatív gyakorisági görbéje.....	59
22. ábra: A különböző helyszíneken (barlangon kívül, barlangon belül a 2. és 8. mérési ponton) mért hőmérséklet értékek változása a hosszú távú (2009.10.27-2011.02.22.) mérés során	60

23. ábra: A különböző helyszíneken (barlangon kívül, barlangon belül a 2. és 8. mérési ponton) mért légnyomás értékek változása a hosszú távú (2009.10.27-2011.02.22.) mérés során	62
24. ábra: A különböző helyszíneken (barlangon kívül, barlangon belül a 2. és 8. mérési ponton) mért hrelatív páratartalom értékek változása a hosszú távú (2009.10.27-2011.02.22.) mérés során	62
25. ábra: Mért idősorok közötti korreláció vizsgálat.....	64
26. ábra: Barlangi agyagminták gamma spektroszkópiával meghatározott fajlagos ²²⁶ Ra-, ²³² Th- és ⁴⁰ K aktivitásának változása az egyes mintavételi pontokon	65
27. ábra: A 2. pontban mélyített fűrészből származó barlangi agyag fajlagos ²²⁶ Ra-, ²³² Th- és ⁴⁰ K aktivitásának változása a mélységgel	66
28. ábra: Az 5. pontban mélyített fűrészből származó barlangi agyag fajlagos ²²⁶ Ra-, ²³² Th- és ⁴⁰ K aktivitásának változása a mélységgel	67
29. ábra: A 2011-ben (02.22-én, 04.08-án, 07.21-én, 09.23-án és 11.16-án) gyűjtött csepegő vizek oldott radontartalma az egyes mérési pontokon	70
30. ábra: A barlangi agyag pórusaiban lévő levegő radonkoncentrációja az egyes mérési pontokon.....	71
31. ábra: A barlangi agyag pórusaiban lévő levegő radonkoncentrációjának ismételt mérése a 6. mérési ponton.....	72
32. ábra: Barlangi agyag felszínéről származó minták szemcseméret eloszlása. A narancssárga szín a 2., a zöld a 3., a citromsárga az 5. A kék pedig a 6. mintavételezési pontról gyűjtött mintákat jelöli.....	73
33. ábra: A 2. mérési/mintavételezési ponton mélyített fűrészből származó barlangi agyagminták szemcseméret eloszlása.	74
34. ábra: Az 5. mérési/mintavételezési ponton mélyített fűrészből származó barlangi agyagminták szemcseméret eloszlása. A narancssárga szín a legfelső szintből, a zöld a második szintből, a kék, a középső szintből, a citromsárga a negyedik szintből, a szürke pedig az ötödik, legmélyebb szintből származó mintát jelöli.	75
35. ábra: A Pál-völgyi-barlang 2. mintavételezési pontjáról származó agyagminta egy szemcséjének viaszszórt elektronképe. Kvarc (szürke fázis) és vastartalmú (fehér részek, gömbös szerkezet) szemcse.....	76
36. ábra: A Pál-völgyi-barlang 5. mintavételezési pontjáról származó agyagminta egy vegyes összetételű szemcséjének viaszszórt elektronképe	77
37. ábra: A Pál-völgyi-barlang 6. mintavételezési pontjáról származó agyagminta egy framboidális kinézetű szemcséjének viaszszórt elektronképe	78
38. ábra: Szépvölgyi Mészko savazás utáni oldási maradékból (0,125-0,25 mm) szeparált szemcse viaszszórt elektronképe és karakterisztikus röntgen-spektruma. A képi megjelenés és a felvett spektrum vulkáni kőzetre utal, ami az üledékes kőzet keletkezése során kerülhetett bele.	79
39. ábra: Szépvölgyi Mészko savazás utáni oldási maradékból származó titán-, kvarc-, vas-oxid- és agyagásvány tartalmú átalakult (mágnás) kőzetszemcse viaszszórt elektronképe (felső) és optikai mikroszkópos képe (alsó).	79
40. ábra: Budai Márka savazás utáni oldási maradékból származó Fe-tartalmú szemcse viaszszórt elektronképe (felső), optikai mikroszkópos képe (alsó) és röntgen spektruma (jobb felső).	80
41. ábra: Az agyagos kitöltés felszínéről a 6. mérési/mintavételezési ponton gyűjtött minta röntgen pordiffrakciós elemzésének eredménye	80
42. ábra: A 2. mintavételi pontról származó agyagmintából készített orientált preparátum röntgen pordiffrakciós elemzésének eredménye.	81

43. ábra: Az 5. mintavételi pontról származó agyagmintából készített orientált preparátum röntgen pordiffrakciós elemzésének eredménye.	82
44. ábra: A radonkoncentráció passzív detektoros vizsgálatának eredményei a Molnár János-barlang Kessler termében	83
45. ábra: Radonkoncentráció monitorozása a Molnár János-barlangban 2011. szeptemberében	85
46. ábra: Radonkoncentráció monitorozása a Molnár János-barlangban 2011. novemberétől 2012. februárig. A kék vonal a radonkoncentráció, a narancssárga a külső hőmérséklet értékeinek változását mutatja	85
47. ábra: Radonkoncentráció monitorozása a Molnár János-barlangban 2011. novemberétől 2012. februárig. A kék vonal a radonkoncentráció, a narancssárga a barlangi hőmérséklet értékeinek változását mutatja (radonmonitor által mért hőmérséklet)	86
48. ábra: A barlangi levegő radonkoncentrációjának és hőmérsékletének változása a Molnár János-barlangban	86
49. ábra: Vas (fényes részek) és kvarctartalmú (szürke fázis) szemcse viaszszórt elektronképe, vízalatti agyag, Molnár János-barlang	89
50. ábra: Mangán-gazdag szemcsehalmoz viaszszórt elektronképe és röntgen spektruma, vízalatti agyag, Molnár János-barlang	89
51. ábra: Framboidális kinézetű szemcsékből álló aggregátum viaszszórt elektronképe, vízalatti agyag, Molnár János-barlang	90
52. ábra: Molnár János-barlangból származó vízminták oldott radontartalma	91
53. ábra: A barlangi levegő radonkoncentrációjának évszakos változása a külső hőmérséklet függvényében a Pál-völgyi-barlangban.	93
54. ábra: Radonkoncentráció szezonális vizsgálat passzív nyomdetektorokkal a Pál-völgyi-barlangban.....	94
55. ábra: Radonkoncentráció évszakos periodicitásának hőmérsékletfüggése a Pál-völgyi- és a Molnár János-barlangban.	95
56. ábra: A Pál-völgyi-barlangban végzett hosszú távú (egy éves) radonkoncentráció mérés eredményeinek autokorreláció diagramja az 5RSSH simítás után, mutatva a 24 órás periódust.	96
57. ábra: A Pál-völgyi-barlangban végzett hosszú távú (egy éves) radonkoncentráció mérés eredményeinek periodogramja az 5RSSH simítás után. A periodogramon jól látszik a 12 és 24 órás periódus.	96
58. ábra: A radonkoncentráció napszakos periodicitása a Molnár János-barlangban, 2011. szeptemberében	97
59. ábra: Radonkoncentráció napszakos periodicitásának vizsgálata 2008.09.18-10.15. között egy kővágószőlősi épület pincéjében	98
60. ábra: A barlangi levegő radonkoncentrációjának alakulása. A V térfogattal rendelkező barlangban S nagyságú felületen történik radon fluxus. A kialakuló radonkoncentrációt az atmoszférikus levegővel (külső levegő) történő légcsera hígítja, aminek következtében λV térfogatú A aktivitású levegő távozik a barlangból és helyére ugyanakkora, λV térfogatú A atm aktivitású levegő érkezik.	100
61. ábra: Kihúzó és behúzó légáramlat alakulása a barlangban a külső hőmérséklet függvényében.	102
62. ábra: A közel másfél éves radonkoncentráció monitorozás eredménye.	103
Jelmagyarázat: AM-számítási közép, GM-mértani közép, STD-szórás.	104
63. ábra: A radonkoncentráció és külső hőmérséklet közötti korrelációs koefficiens változásának szezonális periodicitása	106

64. ábra: A négy vizsgált (Pál-völgyi-barlang: PB2, PB3, PB5, PB6, PB7, Hideg-lyuk: HLY1, HLY2, HLY3, Harcsaszájú-barlang: HSZ1, HSZ2, Molnár János-barlang: MJB) különböző barlangból, származó összesen 11 agyagminta fajlagos ^{226}Ra , ^{232}Th és ^{40}K aktivitása.	109
65. ábra: A négy vizsgált (Pál-völgyi-barlang: PB2, PB3, PB5, PB6, PB7, Hideg-lyuk: HLY1, HLY2, HLY3, Harcsaszájú-barlang: HSZ1, HSZ2, Molnár János-barlang: MJB) barlangból, származó összesen 11 agyagminta radon és toron kibocsátása.	110
66. ábra: A radonkoncentráció értékének alakulása a Pál-völgyi-barlangban (2009, 2010) és a Molnár János-barlangban (2011) az évnek ugyanabban az időszakában (november 17-február 21).....	113
67. ábra: A radonkoncentráció értékének alakulása a Pál-völgyi-barlangban (2009, 2010) és a Molnár János-barlangban (2011) az évnek ugyanabban az időszakában (december 22-január 11.).....	114
68. ábra: A radonkoncentráció értékének alakulása a Pál-völgyi-barlangban (2009, 2010) és a Molnár János-barlangban (2011) az évnek ugyanabban az időszakában (január 11-február 15.)	114
69. ábra: A radonkoncentráció értékének alakulása a Pál-völgyi-barlangban (2010) és a Molnár János-barlangban (2011) az évnek ugyanabban az időszakában (szeptember 10-22)	116

TÁBLÁZATJEGYZÉK

1. táblázat: Radon izotópok.....	11
2. táblázat: A Pál-völgyi-barlangban gyűjtött mintákat és az azokon elvégzett vizsgálatokat összefoglaló táblázat. A vizsgálatok rövidítései: Rn-E: radon kibocsátás, ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K akt.: ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K izotópok fajlagos aktivitása, SEM: pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálat, RTG-diff: röntgen porfiffrakció vizsgálat.....	36
3. táblázat: A Pál-völgyi-barlangban elhelyezett Raduet nyomdetektorok expozíciós ideje... 54	54
4. táblázat: Raduet típusú passzív nyomdetektorokkal meghatározott évi átlagos radonkoncentráció a Pál-völgyi-barlang egyes mérési pontjain	55
5. táblázat: A Pál-völgyi-barlangban 2009.10.27-2010.10.27 között végzett radonkoncentráció monitorozás adatainak eloszlását leíró statisztikák.....	58
6. táblázat: A barlangon belül és kívül vizsgált meteorológiai paraméterek (hőmérséklet, légnyomás, páratartalom) a 2009.12.11-2010.12.11. közötti időszakban.....	61
7. táblázat: A három különböző helyszínen (barlangon kívül, barlangon belül a 2. és 8. mérési ponton) mért meteorológiai adatok (hőmérséklet, légnyomás, páratartalom) átlagértékeinek összehasonlítása a 2009.12.11-2010.04.21. közötti időszakra vonatkozóan	61
8. táblázat: Barlangi agyagminták gamma spektroszkópiával meghatározott fajlagos ^{226}Ra , ^{232}Th - és ^{40}K aktivitása.....	65
9. táblázat: A 2. pontban mélyített fúrásból származó barlangi agyag fajlagos ^{226}Ra , ^{232}Th - és ^{40}K aktivitása.....	66
10. táblázat: Az 5. pontban mélyített fúrásból származó barlangi agyag fajlagos ^{226}Ra , ^{232}Th - és ^{40}K aktivitása.....	67
11. táblázat: Kalcit-, mészkő- és márgaminták gamma spektroszkópiával meghatározott fajlagos ^{226}Ra , ^{232}Th - és ^{40}K -aktivitása.....	68
12. táblázat: Barlangi agyagminták radon és toron kibocsátásának eredményei	68
13. táblázat: A 2. ponton mélyített fúrásból származó agyagminták radon és toron kibocsátásának eredményei	69
14. táblázat: Az 5. ponton mélyített fúrásból származó barlangi agyagminták radon és toron kibocsátásának eredményei	69
15. táblázat: Kőzetminták (kőzetalkotó) radon kibocsátása.....	69
16. táblázat: A különböző mérési pontokon 2011-ben (02.22-én, 04.08-án, 07.21-én, 09.23-án és 11.16-án) vett vízminták oldott radontartalmának eredményei	70
17. táblázat: A Molnár János-barlangban (Kessler terem) elhelyezett nyomdetektorok expozíciós ideje.....	83
18. táblázat :A Molnár János-barlangból származó víz alatti agyagminta fizikai vizsgálatának eredményei	88
19. táblázat: A Hideg-lyukból (HLY1, HLY2, HLY3) és Harcsaszájú-barlangból (HSZ1, HSZ2) származó agyagminták fajlagos ^{226}Ra , ^{232}Th és ^{40}K aktivitása	92
20. táblázat: A Hideg-lyukból (HLY1, HLY2, HLY3) és Harcsaszájú-barlangból (HSZ1, HSZ2) származó agyagminták radon és toron kibocsátása.....	92
21. táblázat: A nyári és téli periódusok elkülönítése.....	104
22. táblázat: A radonkoncentráció értékeinek változása a téli és nyári időszakokban.....	104
23. táblázat: A radonkoncentráció (AlphaGuard) és a külső hőmérséklet közötti korrelációs koefficiens értékei a Pál-völgyi-barlangban a 2010-es év egyes hónapjaiban.....	105
24. táblázat: A novembertől-februárig tartó mérések alapstatisztikai értékelése. A Pv-b jelölés a Pál-völgyi-barlangot, az MJ-b a Molnár János-barlangot jelöli.....	113
25. táblázat: A szeptemberi mérések alapstatisztikai értékelése.....	116
26. táblázat: A Pál-völgyi-barlangban és a Molnár János-barlangban végzett passzív nyomdetektoros mérések kb. 1,5 havi átlagos radonkoncentráció eredményei.....	117

27. táblázat: Látszólagos egyensúlyi állandó értéke a Pál-völgyi-barlangból gyűjtött vízminták és a barlang levegőjének radonkoncentrációja között.....	119
---	-----

*“Csak ha leereszkedünk a szakadék legmélyére,
akkor találjuk meg az élet kincseit.
Ahol összerogysz,
ott lapul a kincs.
Amit keresel, az éppen abban a barlangban rejlik,
ahová félsz belépni.”*
(Joseph Campbell)

1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉS

Azóta, hogy Henry Becquerel felfedezte a radioaktivitást, 116 év telt el, ennek ellenére a radioaktivitás, háttérsugárzás, izotóp szavakhoz egyesekben még ma is félelem, ellenérzés társul. Ez elsősorban a nukleáris fegyverkísérletek és az atomerőműveket ért balesetek miatt kialakult, majd felerősített negatív tapasztalatoknak köszönhető. Sokan azonban figyelmen kívül hagyják (vagy nem tudják), hogy az élővilágot a Föld kialakulása óta éri természetes eredetű ionizáló sugárzás, az úgynevezett természetes háttérsugárzás, amelynek kb. 50%-áért egy radioaktív nemesgáz, a radon felelős (UNSCEAR, 2000; SOMLAI et al., 2000).

A radon változó koncentrációban szinte mindenhol megtalálható környezetünkben. Jelentőségét egészségre gyakorolt hatásának köszönheti, ugyanis nagy mennyiségben bizonyítottan növeli a tüdőrák kialakulásának kockázatát (DARBY et al., 2005). Tanulmányozása, vizsgálata, mérése ezért kiemelt fontosságú. Időnk döntő hányadát zárt terekben töltjük, ezért a legtöbb kutatás beltér radiometriai felmérésére irányul (pl.: SOMLAI et al., 2006; TÓTH et al., 1998; ABUMURAD & AL-OMARI, 2008; KARPINSKA et al., 2004; KHAN et al., 2008; CELIK et al., 2008; FRANCO-MARINA et al., 2003; GERVINO et al., 2007; GILLMORE et al., 2005; MARLEY, 2001). A lakóépületek és munkahelyek levegőjének radonkoncentrációját nagy mértékben befolyásolják a lakók, dolgozók szokásai (szellőztetés, fűtési, építkezési, életmódbeli, stb. habitusok). Állandó, vagy megközelítőleg stabil környezeti feltételek mellett azonban a radonkoncentráció időbeli változásai és a változások okai jól tanulmányozhatók (HAKL, 1997).

Doktori kutatásaim során Budán, a Pál-völgyi-barlangban (ami időközben Magyarország leghosszabb barlangrendszerévé vált, miután lelkes barlangászok tömege sokévi kutatás után megtalálta az összeköttetést a Pál-völgyi-Mátyáshegyi-barlangrendszer a Hideg-lyuk és a Harcsaszájú-barlang között) és a világon egyedülálló, jelenleg legnagyobb ismert aktív hévizes barlangban, a karsztvíz szintjében jelenleg is aktívan oldódó, formálódó Molnár János-barlangban végeztem méréseket.

Az eredmények információval szolgálnak a barlangok, mint természetes objektumok radioaktivitásáról, magának a barlangi levegőnek a radonkoncentrációjáról - ami bizonyos

esetekben kiemelkedően nagy lehet -, annak időbeli változásairól, a barlangban megtalálható anyagok (kőzetek, agyagos kitöltés) radioaktív izotóptartalmáról és a radon kibocsátási képességéről. Továbbá, magának a levegő radonkoncentrációjának a vizsgálata a barlang és környezete közötti kapcsolat erősségéről ad felvilágosítást. Segítségével meghatározható egy adott terem szellőzési foka, ami tulajdonképpen a barlang térfogatát kitöltő levegő kicserélődéséhez szükséges időről ad információt. A külső meteorológiai paraméterek és a barlangi levegő radonkoncentrációja közötti összefüggés is a barlang és környezete közötti viszonyról szolgál eredményekkel. Ezek az adatok értékesek lehetnek a barlangkutatásban, segíthetnek megérteni a legtöbbször bonyolult barlangi járatok légmozgásának jellemzőit; illetve a radonról szerzett esetleges új ismereteink felhasználhatók és beépíthetők az alkalmazott kutatásokba (pl. lakossági mérések) is.

Doktori kutatásom során fontos feladatnak tekintetem a radioaktivitással, természetes háttérsugárzással, radonnal kapcsolatos ismeretek bővítését minél szélesebb körben - így lakossági fórumokon is -, hiszen számtalan társadalmi, gazdasági és politikai vonatkozású kérdés érinti a radioaktivitás témáját. Felelősségteljes döntés pedig csak abban az esetben hozható, ha rendelkezünk az érintett területtel kapcsolatos, szükséges tudással. Ez a feltétele annak, hogy elkerüljük a felesleges félelemkeltést, azonban tisztában legyünk a potenciális valós veszélyekkel, azok következményeivel és a megelőzés lehetőségeivel.

Doktori kutatásom fő célja a radonkoncentráció időbeli változásainak vizsgálata, a barlangi levegő radonkoncentrációjában megfigyelhető hosszú (évszakos)- és rövidtávú (napszakos) változások leírása, azok okainak felderítése, illetve a radonkoncentráció és más környezeti (meteorológiai) paraméterek közötti kapcsolatok felderítése. Emellett a barlangokra jellemző, általában kiemelkedően nagy radonkoncentráció földtani forrásának meghatározása is szerepelt terveim között. A kutatás során lehetőségem nyílt két budai-hegységi barlang összehasonlítására a rájuk jellemző radonszint, valamint a bennük található agyagos kitöltés radonkibocsátási képessége és ^{238}U , ^{232}Th illetve ^{226}Ra tartalma alapján.

2. A RADON ELMÉLETI HÁTTERE

2.1. Természetes háttérsugárzás és a radon

Alapvetően megkülönböztetünk természetes és mesterséges forrásból eredő radioaktivitást. A lakosság sugárterhelésének mindössze 15,6 %-a származik mesterséges forrásból, ebből 15,3 %-ért az orvosi diagnosztika a felelős, a maradék 0,30 %-on a légköri atomfegyver kísérletek, a csernobili katasztrófa, továbbá a nukleáris energiatermelés osztoznak (KÖTELES, 1994). A

lakossági sugárterhelés nagyobb hányada természetes eredetű, amely elsősorban földi (a Föld kialakulása óta jelenlévő, máig le nem bomlott, hosszú felezési idejű, földkéregben jelenlévő radioizotópokból¹ származó) és kozmikus (a világegyetemben kozmikus sugárzás hatására keletkező kozmogén radioizotópokból származó) sugárzásból tevődik össze. A kozmikus és a terasztriális (földi eredetű) külső sugárzás mellett a természetes háttérsugárzás összetevője a légzés és táplálkozás útján a szervezetbe került radionuklidok okozta belső sugárterhelés is (ICRP, 1991).

A lakosságot érintő természetes eredetű háttérsugárzásból eredő effektív dózis egész Földre vonatkoztatott átlagos értéke 2,4 mSv/év. Ennek több mint 50 %-a a lakások levegőjében lévő radonnak és bomlástermékeinek a belégzéséből származik (UNSCEAR, 2000; SOMLAI et al., 2000).

A természetben előforduló radioaktív bomlási sorok mindegyikében találunk radon izotópot. Az ^{235}U bomlási sorában található a ^{219}Rn izotóp (aktinon), a ^{232}Th -sor egyik bomlásterméke a ^{220}Rn (toron), és az ^{238}U egyik leányeleme a ^{222}Rn (radon) (1. táblázat). Az aktinon mennyisége a természetben anyaelemének, az ^{235}U előfordulási gyakoriságának (az ^{235}U a természetes uránnak csak 0,7 %-a) és rövid felezési idejének köszönhetően (3,9 s) gyakorlatilag elhanyagolható (DENMAN et al., 2007). Szintén rövid felezési ideje (55 s) miatt általában toronnal is csak nagy ^{232}Th koncentráció esetén kell számolnunk.

Bomlási sor	Radon izotóp	Elnevezés	Felezési idő
^{238}U	^{222}Rn	Radon	3,8 nap
^{235}U	^{219}Rn	Aktinon	3,9 s
^{232}Th	^{220}Rn	Toron	55 s

1. táblázat: Radon izotópok

2.2. A radon fizikai és kémiai tulajdonságai

A 86-os rendszámú, 222 relatív atomtömeggel rendelkező radon a periódusos rendszer VIII.a. oszlopába, a nemesgázok csoportjába tartozik. Molekulája egyatomos, vegyértéke 0, sűrűsége pedig $9,73 \text{ g/cm}^3$, vagyis több, mint hétszer nagyobb a levegő sűrűségénél. A Henry-törvény szerint oldódik vízben és más oldószerekben, különösen szerves oldószerekben. Oldhatósági tényezője a hőmérséklet függvénye (BÁNYÁSZ & MÓCSY, 2005).

¹ radioizotóp: a radionuklid szinonimájaként használjuk, adott tömegszámú és rendszámú atommagot jelent.

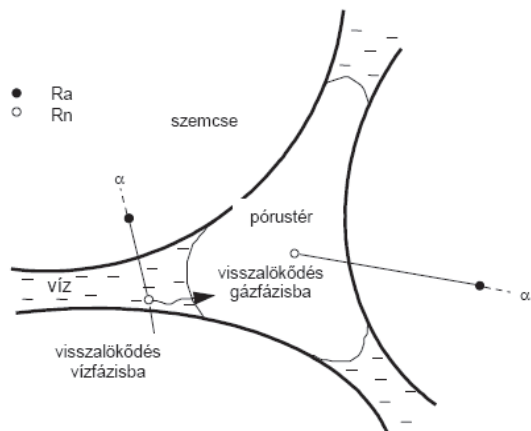
2.3. Radon a környezetünkben

A kőzetek és talajok szinte minden esetben tartalmaznak valamilyen mennyiségű (néhány ppb-tól sok száz ppm-ig) uránt, tóriumot (az urán földkéregre vonatkozó gyakorisága 2,8 ppm (TAYLOR & MCLEAN, 1995)). Olyan területeken, ahol a felszín közelében uránt tartalmazó ásványok (pl.: uraninit, cirkon, monacit, allanit, xenotim), illetve ezeket az ásványokat tartalmazó kőzetek mállástermékeként keletkezett talajok borítják a felszínt, potenciálisan nagy radonkoncentráció alakulhat ki (pl. KUMAR et al., 2003).

A közetszemcsékben a rádiumatomok különbözőképpen, egyrészt a közetszemcsék térfogatában, másrészt a szemcsék felületén helyezkedhetnek el. A kristályrácsban kötött rádiumból keletkező radon csak úgy képes a felszínre vagy a nagyobb földalatti terekbe (pl. barlangokba) jutni, ha ki tud lépni a szilárd anyagból a kristályok és a talaj szemcséinek pórusai közé. A radon kőzetekben végbemenő migrációs folyamatát ez alapján két szakaszra bonthatjuk: 1. a radonatomok pórustérbe való emanációja, 2. a radonatomok migrációja a pórustérben. Az emanációs folyamatot további két részre bonthatjuk: a legelső lépés a radonatom keletkezése, amely a rádium alfa-bomlása útján megy végbe, majd ezt követi a radonatom kijutása az ásványszemcséből. Az anyaelem bomlásakor a kristályrácsban keletkező radon legfőképpen visszalökődés által kerülhet a pórustérbe (1. ábra). Általában azonban a radon atom nagyobb visszalökődési energiával rendelkezik, mint amennyi a pórustérbe jutáshoz szükséges, ezért nagy a valószínűsége annak, hogy a szemközi szemcsébe csapódik be és ott fékeződik le. A megállított radon atom az általa roncsolt csatormán keresztül, vízdás révén juthat a pórustérbe (TANNER, 1964; TANNER, 1980).

Ha a pórustér részben vagy teljesen vízzel telített (1. ábra), az már képes elnyelni a radon atom energiáját, emiatt nagyobb valószínűséggel marad a pórusvízben, ahonnan lehetősége nyílik kifelé diffundálni a pórusközi tér levegővel töltött részeibe (Tanner, 1964; Tanner, 1980).

Az emanációt befolyásoló legfontosabb tényezők a rádiumatom elhelyezkedése a közetszemcsé térfogatában/felületén, a visszalökődés iránya, a pórusvíz mennyisége és a kőzet szemcseméret-eloszlása.



1. ábra: Visszalökődési jelenségek az anyagokban (a kitöltött fekete kör a rádiumot, a fehér a radont jelöli)

(Tanner, 1980 alapján)

Exhaláció alatt a pórustérbe jutott radonatomok atmoszférába történő kilépését értjük. Ezt befolyásolja a talajgáz radonkoncentrációja, a talaj szemcseátmérője, gázáteresztő képessége és nedvességtartalma, továbbá a csapadékviz viszonyok, egyéb gázokkal való áramlás mértéke, hőmérséklet- és nyomásviszonyok, évszakok, napszakok váltakozása, ár-apály effektus (COTHERN et al., 1987; BALOGH et al., 1994). A radon tehát emanációval jut a szemcsék közötti pórustérbe, majd onnan exhalációval a levegőbe.

A pórusközi térbe kijutott radon mozgását a talajban két fizikai folyamat határozza meg, a diffúzió, ami a koncentrációkülönbségen alapul, és a pórusokat kitöltő közeg (folyadék, gáz) mozgása, amely magával viszi a radont (advekción). Advekciónak tekinthetjük például a karsztforrásokban oldott radon mozgását, ami a rövid szállítódási idő miatt természetes nyomjelzője lehet a beszivárgási folyamatoknak karsztrendszerekben (pl. EISENLOHR & SURBECK, 1995).

Az első esetben a talaj és a körülötte lévő levegő radonkoncentrációjának különbsége hajtja a folyamatot (CHAUHAN et al., 2008). 3,82 nap felezési ideje alatt a radon, különösen porózus talajok és üledékek esetén, akár 1-2 m távolságot is meg tud tenni csak diffúzióval (KHAN et al., 1997). Advekciónal (áramló közeg) a migráció mértéke ennél nagyobb (több 10 méter) is lehet (FLEISCHER & MOGRO-CAMPERO, 1978; VÁRHEGYI, 1992).

Kiemelkedően nagy beltéri levegő radonkoncentráció esetében a radon migrációját biztosító fő tényező az advekción (NAZAROFF et al., 1985), ami a talaj és az épületbeltér közötti nyomáskülönbségen alapul (EPA, 2001).

Azt, hogy a pórusterbe került radongáz 3,82 nap (^{222}Rn felezési ideje) alatt mekkora utat tud megtenni, befolyásolja a talaj porozitása, permeabilitása, nedvességtartalma, valamint szemcseméret eloszlása (NAZAROFF & NERO, 1988). Minél több, kisebb átmérőjű szemcséből áll a talaj, annál nagyobb felületen történhet radon-emanáció (CHAU et al., 2005). A radon migrációját befolyásolja továbbá a hőmérséklet, a nyomáskülönbség és a széljárás változása is (DENMAN et al., 2007). Az évi átlagos radonkoncentráció világátlagos szabadban 5-10 Bq/m³ (SOMLAI ET AL, 2000; UNSCEAR, 2000).

2.4. A radonprobléma története

1470. körül kiterjedt ércbányászat indult be a Cseh-Szász Érchegeység (Erzgebirge) északi lejtőjén, a szász Schneeberg közelében, valamint a déli részekén Joachimsthal (ma Jachymov, Csehország) környékén. Míg a déli területeken az ezüstércet a felszínen, vagy annak közelében bányászták, az északi lejtőkön már nagyobb mélységekben fejtették az ércet. A 16. század elején a Schneeberg környéki bányászok között, különösen a fiatalabb munkások körében szokatlanul nagy tüdőbaj miatti halálozási arányt figyeltek meg. A 17. és 18. századokban tovább emelkedett a tüdőbaj gyakorisága, amelyet később „Schneeberg Lungenkrankheit”-nek (shneebergi tüdőbaj) neveztek el. 1879-ben Haerting és Hesse azonosította a betegséget a tüdőrákkal, megemlíti továbbá, hogy abban az időben a schneebergi régió bányászainak 75 %-a halt meg ebben a betegségben. A joachimsthal-i ércekből 1898-ban Marie és Pierre Curie rádiumot (^{226}Ra) és polóniumot (^{210}Po) vont ki (ICRP, 1993). Egy évvel később, 1899-ben Rutherford és Thomson felfedezte az anyagok ionizáló képességét. Az akkoriban rádium emanációnak nevezett radont (^{222}Rn) a rádium bomlástermékeként keletkező radioaktív nemesgázként azonosították. 1900-ban Dorn német fizikus hasonló kísérleteket végzett és alátámasztotta Rutherfordék felfedezését, amely szerint az alfa-sugárzó gáz a rádiumtól származik (egyes irodalmak a „radon” elnevezését Dorn-nak tulajdonítják).

A shneebergi és joachimsthal-i bányák levegőjében 1901-ben Elster és Geitel végeztek először radonméréseket, és következetesen nagy radonaktivitás-koncentráció értékeket mértek. Ezek alapján tételezték fel, hogy összefüggés van a tüdőrák, és az ezekben a bányákban jelenlévő nagy radontartalom között (ICRP, 1993; BÁNYÁSZ & MÓCSY., 2005). A radonkoncentráció és a tüdőrák közötti kapcsolattal a 20. században több kutatóprogram és átfogó vizsgálat

foglalkozott, a jachymovi és schneebergi adatok azonban nem tették lehetővé a radontól származó sugárterhelés és a tüdőrák közötti kapcsolat számszerű becslését (ICRP, 1993).

2.5. A Radon egészségre gyakorolt hatásai

Az ionizáló sugárzástól eredő sugárterhelés egészségre gyakorolt hatásainak becslése leginkább emberi populációk epidemiológiai vizsgálatain alapul. A sugárzással kapcsolatban az epidemiológia a sugárterhelés és az egészségre gyakorolt hatások közti statisztikus összefüggések megállapításával foglalkozik (ICRP, 1993).

A radon közvetlen anyaeleméből a ^{226}Ra -ból α -sugárzással keletkezik. Amikor a radont vagy a többnyire aeroszol-részecskékhez tapadó leányelemeket belélegezzük, azok a hörgők és a tüdő belső felületét borító bronchiális és alveoláris hámsejteket közvetlenül sugározzák be (SZERBIN, 1994; ICRP, 1966; WHO, 2009). A hörgő- illetve az alveoláris hám szövetre lerakódott bomlástermékek a légzőrendszerben működő transzport folyamatok hatása alá kerülnek és részben eltávoznak a légzőrendszerből. A tüdő régióban az oldódási diffúzió a meghatározó kitisztulási folyamat, amely a vérbe való kiválasztódást vonja maga után. Ennek az az előfeltétele, hogy a bomlástermékek vagy oldható alakban legyenek jelen, vagy hogy az aeroszolra tapadt bomlástermék-atom leoldható legyen a hordozó aeroszolszemcséről. A ^{222}Rn -bomlástermékeknek egy további része a falósejtek hatására a terminális hörgőkhöz jut. Itt a csillószőrök mozgása gondoskodik a kijutásról (TÓTH., 1983; JAMES, 1988).

Az α -részecskék ionizációs képessége fajlagosan nagy, ennek köszönhetően a hatótávolságuk az anyagban kicsi (30 μm körül van, vagyis a bőrt borító elhalt hámsejtek már felfogják a radon sugárzásának jelentős részét) (SZERBIN, 1994). Az ionizáló sugárzások, így az α -sugárzás is, a biológiai rendszerekben direkt vagy indirekt módon fejtik ki hatásukat. A direkt hatás eredményeként közvetlenül az a molekula károsodik, amelyben az energiaátadás megtörtént. Az élő sejtekben a direkt hatás következtében károsulhatnak a sejtek enzim-rendszereit alkotó és az öröklődő információt hordozó makromolekulák, valamint különböző membrán-struktúrák (EVANS, 1991). Az indirekt hatás alapja a radioaktív sugárzás által a vízben keltett nagy reakcióképességű szabad gyökök keletkezése, a radiolízis. A létrejövő szabad gyökök a sejtekben keletkezési helyüktől távolabb transzformálhatják az ionizáló sugárzás elnyelt energiáját. A fent említett hatások következtében bekövetkező sejtkárosodások anyagszere-zavarokhoz vezethetnek, súlyosabb esetben kromoszóma-aberrációk, burjánzásra hajlamos transzformációk keletkezhetnek (JAMES, 1988; SZERBIN, 1994; JOSTES, 1996) (molekuláris és sejtszinten a radon és a radon leányelemeinek hatására

megváltozhat a sejt vagy a kromoszóma szerkezete és génmutációk (akár bázispár-csere) jöhetnek létre (ICRP, 1966; BROOKS et al, 1992; TAYA et al, 1994, JOSTES, 1996).

Az élő szervezetben kialakuló biológiai reakciók, hatások mértéke arányos a sejtek, szövetek által elnyelt energia mennyiségével, a dózissal. Kis dózisok esetében (körülbelül 100 mSv-ig) csak statisztikai módszerrel kimutatható sztochasztikus hatásról beszélünk. Nagyobb dózisú sugárzás eredményeként létrejövő, citogenetikai módszerekkel már kimutatható elváltozás esetében a hatás determinisztikus és csak egy bizonyos küszöbdózis felett jelenik meg (ICRP, 1987; SZERBIN, 1994).

A radonnak illetve szintén α -bomló leányelemeinek ismert egészségkárosító hatása az, hogy hosszú expozíciós idő után növelik a tüdőrák kialakulásának kockázatát (pl. ICRP, 1966; ICRP, 1987; SZERBIN, 1994; KÖTELES, 2007; WHO, 2009).

2.6. Radonnal kapcsolatos szabályozások Magyarországon

Magyarországon a sugárvédelmi előírásokat (a radonnal kapcsolatosakat is) az ún. Atomtörvény végrehajtási rendelete, a 16/2000 sz. EüM Rendelet tartalmazza részletesen. Ez a rendelet az ICRP-60-as és a radon tekintetében az ICRP-65-ös ajánlásokat tartalmazza, azonban a radonra vonatkozóan az átvétel nem teljes körű. A rendelet nem tartalmazza a lakások radonszintjének szabályozását, csak a foglalkozási (munkahelyi) radonterheléssel foglalkozik.

A foglalkozási sugárterhelésnek kitett munkavállalót munkavégzése során ért sugárzás, az alkalmazott mesterséges és fokozott sugárterhelést eredményező természetes forrásokból származó, külső és belső sugárterhelés együttesen, egymást követő 5 naptári évre összegezve nem haladhatja meg a 100 mSv effektív dóziskorlátot. Az effektív dózis egyetlen naptári évben sem haladhatja meg az 50 mSv értéket. Ezekről a feltételektől eltérő körülmények között a természetes forrásoktól származó munkahelyi sugárterhelést szabályos körülmények mellett tartósan fennálló sugárterhelésnek kell tekinteni, amelyre a beavatkozásokkal szemben támasztott követelmények érvényesek. Az ilyen esetekre vonatkozó cselekvési szint 1000 Bq/m³ radon-koncentráció a levegőben éves átlagban.

A személyzet egyéni sugárterhelését a rendelet 2. számú függeléké alapján ellenőrizni kell akkor is, ha a sugárterhelés természetes forrásokból ered. Ilyen munkahelyek, tevékenységek, foglalkozási csoportok közé tartoznak a barlangterápiás részlegek, turisztikai látványosságot képező barlangok, föld alatti bányauzemek és egyéb föld alatti munkahelyek.

Az Egészségügyi Világszervezet (WHO) ajánlásokat tesz lakóépületek maximálisan megengedhető radonkoncentrációjára is. Ez alapján az egyes országok illetékes hatóságai és

szervei az adott ország jellemzőit (a radon eloszlása az adott országban, nagy radonszinttel rendelkező házak száma, beltéri radonkoncentráció számtani középértéke, dohányzással kapcsolatos szokások) figyelembe véve szabja meg a határértéket. Az ajánlott értéket meghaladó koncentrációk esetén (ajánlott vagy kötelező) beavatkozás szükséges. A WHO a legújabb kutatási eredmények alapján 100 Bq/m^3 radonkoncentrációt ajánl. Ha ez a szint nem érhető el, a határérték akkor sem haladhatja meg a 300 Bq/m^3 -t, ami az ICRP számításai alapján 10 mSv/éves dózist jelent (WHO, 2009). Hazánkban, ahogy korábban már említettem, a lakóépületek levegőjének maximálisan megengedhető radonkoncentrációjára nincs hatályos törvényi előírás...

2.7. Kutatástörténet - radon a barlangokban

Évtizedek óta ismert, hogy föld alatti munkahelyeken, bányákban, barlangokban, barlangfürdőkben kiemelkedően nagy radonkoncentráció alakulhat ki (pl.: JOVANOVIĆ, 1996; HAKL et al, 1997a; HAKL et al, 1997b; PRZYLIBSKI, 1999, GILLMORE et al., 2000, LARIO et al, 2006, CSIGE, 2008; SOMLAI et al, 2011). A nagy radonkoncentráció okozta káros hatásokról (elsősorban tüdőrák) legelőször – a 2.4. fejezetben említett – bányászokon végzett epidemiológiai vizsgálatok eredményei adtak tanúbizonyságot. A 70-es években a világ számos barlangjában kezdtek el a radonkoncentráció értékének monitorozását (WILKENING & WATKINS, 1976; YARBOROUGH, 1978; SOMOGYI ET AL., 1983). A barlangokban általában két vizsgálati szempont alapján végeznek radonkutatást:

1. A barlangban dolgozók, a barlangot látogató turisták és a barlangászok radontól származó dózisterhelésének egészségre gyakorolt hatása.

2. Radonvizsgálatok eredményeinek tudományos felhasználása: radon a barlangi légmozgás nyomjelzője lehet, illetve segíthet a speciális mikroklíma kialakulásának jobb megértésében.

Egy harmadik nézőpont lehet a levegőben lévő radon szerepe a barlangterápiában. Ma is működik olyan gyógybarlang, ahol az úgynevezett radonkúra is része egyes kezeléseknak (pl. Gasteini gyógybarlang, Ausztria, (SOMLAI, 2011)). A tudományos közvélemény jelenlegi állása alapján azonban a barlangi radont inkább kockázati tényezőnek tekintik (GILLMORE et al., 2000; KISS et al., 2004, SOMLAI et al, 2011).

Kutatási szempontból ennek ellenére hasznos tényezőként is tekinthetünk rá. Mint mindenütt jelenlévő radioaktív nemesgáz, természetes nyomjelzőként vesz részt a légmozgások indikálásában, segítségével még a barlangi szerkezet kutatása is lehetséges (HAKL, 1997; MOLNÁR & DEZSŐ, 2000).

A radonkoncentráció értéke karsztrendszerekben számos tényezőtől (külső és belső) és azok kölcsönhatásaitól függ (KIES et al., 1997). Ilyenek a külső és belső hőmérséklet különbsége, a szélesség, légnyomásváltozás, páratartalom, a barlang geomorfológiája és a kőzetek, illetve üledékek porozitása, rádiumtartalma. Ezek közül a felszínen uralkodó szelek iránya, turbulenciája, a légnyomás ingadozása és a barlang morfológiai adottsága (a járatok irányultsága, tagoltsága, hossza, keresztmetszete) befolyásolja a barlangok szellőzését, és ezen keresztül közvetve hat a radonkoncentrációra. A barlangi huzat alapvető oka azonban a barlangi és a felszíni levegő hőmérséklet-különbsége. A melegebb levegő ritkább, a hidegebb sűrűbb, a légáramlást a kétféle levegő sűrűségkülönbsége okozza (kéményhatás) (pl. NYERGES, 1995). A barlangi radonszint az időjárással összefüggő, jellegzetesen évszakos változásokat mutat, ami nyilvánvalóan a barlang és a felszín között létrejövő légesere (huzat) következménye. Ennek iránya szezonálisan eltérő attól függően, hogy a külső hőmérséklet a barlangban uralkodó állandó hőmérséklethez képest kisebb (tél) vagy éppen nagyobb (nyár) (HAKL et al., 1997a; CSIGE, 2008; GREGORIC et al., 2011; SOMLAI et al, 2011). Télen a barlang levegőjének hőmérséklete nagyobb a külső hőmérsékletnél, így a függőleges járat- és repedésrendszeren keresztül a melegebb barlangi levegő kiáramlik, és helyébe a tágas bejáraton keresztül hideg, kisebb radonaktivitású levegő zúdul be. A barlangban ez a levegő felmelegszik és a barlang fölötti repedésrendszeren keresztül a felszín felé távozik. A folyamat addig folytatódik, amíg a felszíni hőmérséklet a barlangi fölé nem emelkedik. Ekkor megfordul a légkörzés iránya és a bejáraton keresztül kiömlő hideg barlangi levegő helyére a felszín felől a repedésrendszeren keresztül lefelé szivárgó levegő érkezik, ami a repedésrendszerben a nagy felület/térfogat-arány miatt telítődik radonnal, majd ez a levegő lehűlve a bejáraton át távozik (CSIGE, 2008; GREGORIC et al., 2011).

Számos nemzetközi tanulmány foglalkozik spanyolországi, szaúd-arábiai, mexikói, brazilai, görögországi, stb. barlangok levegőjének hosszú távú radonkoncentráció monitorozásával (LARIO et al., 2005; AL-MUSTAFA et al., 2005; PAPASTEFANOU et al., 2005; ALBERGI et al, 2005; ESPINOSA et al., 2008). Az esetek döntő többségében passzív nyomdetektoros módszert alkalmaznak, amellyel a radonkoncentráció időbeli változásainak nagy időfelbontású vizsgálata nem megoldható. Erre nyújt lehetőséget a radonkoncentráció folyamatos, hosszú távú monitorozása, aminek segítségével a barlangban uralkodó stabil meteorológiai körülmények között a radon viselkedését meghatározó fő tényezők leírhatók és tanulmányozhatók.

A hazai mérések a Bükk-hegységbeli Hajnóczy-barlangban kezdődtek 1977-ben Dr. Somogyi György (MTA Atommagkutató Intézete, a továbbiakban ATOMKI Nyomdetektor

Csoportjának akkori vezetője) irányításával. A mérések kezdetben a francia LR-115 (Kodak) 36 típusú nyomdetektorral történtek. A 90-es évek elejétől egy, a Dataqua Kft. által gyártott folyamatos mérést biztosító főlvezető detektoros radonmérő műszer is a Hajnóczy-barlang Nagytermébe került. Ez a műszer 1991-1999. között megszakítás nélkül üzemelt a barlangban és 1 órás időfelbontással mérte a barlangi levegő ^{222}Rn aktivitáskonzentrációját. A nyomdetektorokat (a régi LR-115 típust felváltotta a sokkal érzékenyebb CR-39 típus) az 1978-2000. közötti időszakban összesen közel 200 alkalommal cserélték (CSIGE, 2008).

1987-től, Somogyi György váratlan halála után Hunyadi Ilona, Csige István és Haki József folytatták a kutatásokat (HAKI, 1997). A mérések célja kezdetben elsősorban a ^{222}Rn -aktivitáskonzentráció térbeli és időbeli változásainak vizsgálata volt, a későbbiekben pedig a barlangot különböző célból látogatók radon-sugárvédelmi vizsgálata is (CSIGE, 2008).

Az 1990-es évek elején az ATOMKI munkatársai a nyomdetektoros mérések eredményei alapján Magyarország valamennyi gyógybarlangja esetén (Szemlő-hegyi-barlang, Budapest; Békebarlang, Aggtelek; Kórház-barlang, Tapolca; Abaligeti-barlang, Abaliget; István-barlang, Miskolc) meghatározták a páciensek és a személyzet radontól származó dózisének értékét (CSIGE, 2008). A mérések egy részébe a Pannon Egyetem Radiokémiai és Radioökológiai Tanszéke is bekapcsolódott. A Szemlő-hegyi-barlangban végzett vizsgálatok alapján a páciensek 5-10 %-a szenvedett el 5 mSv-nél nagyobb, radontól származó dózist. A kezelőszemélyzet azonban 15-40 mSv/éves radontól származó sugárterhelést kapott (HUNYADI et al., 1995). A Tapolcai Kórház-barlangban gyógyulók a kezelés időtartama alatt évszaktól függően 0,18-4,22 mSv effektív dózist kaptak (SOMLAI et al, 2007).

A nyomdetektoros méréseket a legtöbb hazai, turisztikai célokat szolgáló barlangban is elvégezték az ATOMKI és a Pannon Egyetem Radiokémiai és Radioökológiai Tanszékének munkatársai. Azokban a barlangokban, ahol a túravezetőket érő radon bomlástermékek belégzéséből származó dózis 10 mSv/év körüli értéket mutatott (például a tapolcai Tavas-barlang, vagy az aggteleki Baradla-barlang) részben az OSSKI, részben a Pannon Egyetem Radiokémiai és Radioökológiai Tanszékének munkatársai végeztek sugárvédelmi jellegű méréseket (CSIGE, 2008; SOMLAI et al, 2008). A mérések alapján pl. a tapolcai Tavas-barlang dolgozói esetében az egy főre jutó átlagos dózis értéke 2004-ben 13,8 mSv, 2005-ben 11,5 mSv, 2006-ban 10,5 mSv volt (SOMLAI et al, 2008). Egy 2011-es tanulmány szerint, amely az évi átlagos radonkoncentráció értékét vizsgálta hazai turisztikai célú barlangokban, a dolgozókat érő radontól származó dózis a Szent István-barlangban és az Anna-barlangban kisebb, mint 6 mSv, a Baradla-barlang Koncert-termében 6 mSv körüli értéket mutat, a Pál-völgyi-barlangban, a Baradla-barlang Kaffka-termében és az Abaligeti-barlangban 12 mSv, a

legnagyobb, 20 mSv körüli értékeket pedig a Szemlő-hegyi és a tapolcai Tavas-barlang esetében tapasztalták (SOMLAI et al, 2011). Évi 470 barlangban töltött órával számolva a Bakony-hegységben barlangászókat is jelentős radontól származó dózis, 19,7 mSv érheti (KÁVÁSI et al, 2010).

Nyomdetektoros mérések alapján HAKL (1997) megállapította, hogy 31 vizsgált magyarországi barlangban az éves átlagos radon aktivitáskonzentráció $0,3\text{-}20\text{ kBq/m}^3$ tartományba esik, a mért radon idősorok periodicitása tipikusan egy vagy fél év, jellemző az éven belüli 2-50 radonkoncentráció minimum/maximum arány, és a barlangok többségére nyári maximum és téli minimum jellemző.

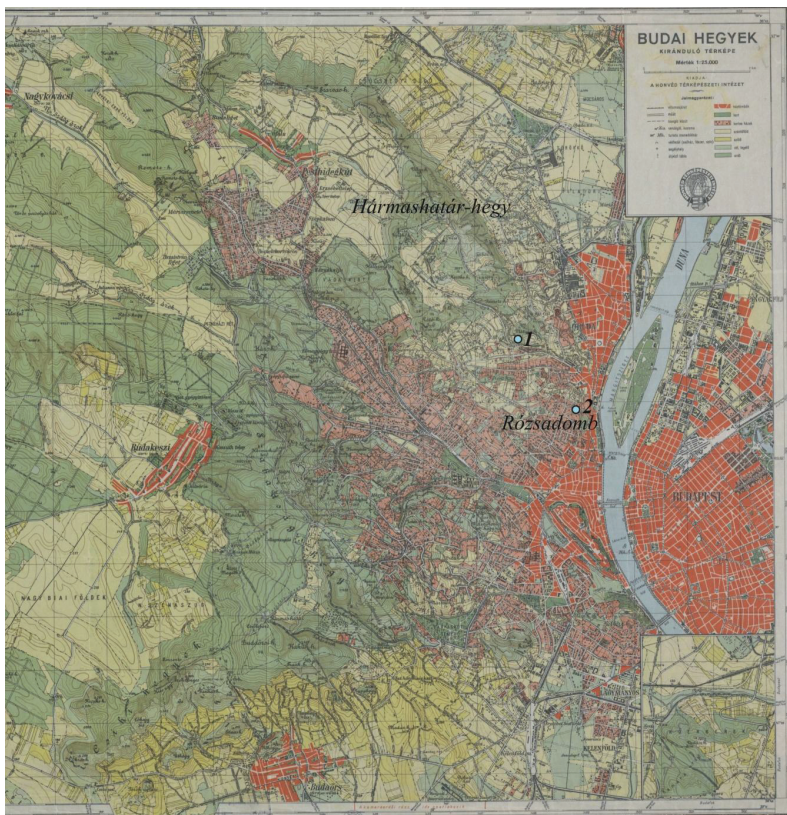
A későbbiekben DEZSŐ és munkatársai (2001) hívták fel a figyelmet arra, hogy a barlangi levegőben található radon forrása nem annyira a befoglaló kőzet, hanem sokkal inkább a járatokban található agyagos üledék lehet (DEZSŐ et al., 2001). Eredményeiket azzal indokolták, hogy az általában jelentősebb rádiumtartalmú agyag a felszíni talajokkal összemérhető mértékben exhalál (in situ radon exhaláció mérések alapján), ezzel szemben a mészkő exhalációjának értéke elhanyagolható.

2.7.1. Radon a Pál-völgyi-barlangban

Az általam is vizsgált Pál-völgyi-barlangban is az MTA Atommagkutató Intézet (ATOMKI) Radon Csoportjának munkatársai, elsősorban Haki József végeztek nyomdetektoros radon méréseket a Bekey Imre Barlangkutató Csoport közreműködésével 1990-1997 között. A kutatás célja a radonkoncentráció térbeli és időbeli változásainak vizsgálata volt a helyspecifikus radonváltozások azonosítása céljából. A vizsgálat során 1990-ben 13 ponton (2. ábra), 1991-1994. között 14 ponton, 1995-1997. között 5 ponton helyeztek el nyomdetektorokat, amelyeket havonta cseréltek. Egy mérési ponttól eltekintve kis téli és nagy nyári értékeket tapasztaltak. Az 1990-1994. közötti adatok alapján a radonkoncentráció értéke a bejáratától való távolság függvényében mindig növekedést mutat, ennek megfelelően az éves átlag $0,7\text{ kBq/m}^3$ -ról $3,1\text{ kBq/m}^3$ -re nő. A maximum/minimum arány 1,4-15,5 közé esik. A PM.4. pontban (2. ábra) az ATOMKI 1990. és 1997. között jellemzően $4\text{-}6\text{ kBq/m}^3$ -es nyári, és $0,1\text{-}0,25\text{ kBq/m}^3$ -es téli radonkoncentráció értékeket mért átlagosan 2 kBq/m^3 -es évi átlaggal (BEKEY IMRE BARLANGKUTATÓ CSOPORT ÉVI JELENTÉSEI 1990-től 1997-ig). Hasonló eredményeket kapott Kávási Norbert is (KÁVÁSI, 2006), eredményei alapján a Pál-völgyi-barlang Lakatos termében a radonkoncentráció értéke télen pár száz Bq/m^3 volt, a nyári maximumot $4,5\text{ kBq/m}^3$ -nél érte el, a radonkoncentráció egy évre vonatkozó átlagértéke $1,8\text{ kBq/m}^3$ volt.

3. VIZSGÁLT TERÜLET FÖLDTANI HÁTTERE

A vizsgált barlangok Budapesten a Rózsadomb térségében található, ami a Hármashatár-hegy csoporthoz tartozik és a Duna jobb partján helyezkedik el (3. ábra). A vizsgált terület a Dunántúli-középhegységi egységen belül a Budai-hegység része. A területen a 19. századforduló óta ismertek barlangok, amelyek kialakulása a térség különleges vízföldtani és közettani-tektonikai viszonyainak köszönhető (LEÉL-ÖSSY, 1995). A Dunántúli-középhegységi szerkezeti egység az alpi fejlődéstörténeti ciklus kezdetén, a Tethys (pontosabban a Vardar óceánág) nyugati elvégződésénél, a self Déli-Alpok és Északi-Mészkő-Alpok (Felső Ausztróalpi takarók) közötti szektorában helyezkedhetett el (pl. HAAS, 1994).



3. ábra: A Háromashatár-hegy és a Rózsadomb elhelyezkedése a Budai-hegységben. Az 1-es pont a Pál-völgyi-barlangot, a 2-es a Molnár János-barlangot jelöli. (forrás: Honvéd Térképészeti Intézet. M. 1:25 000. Budapest, 1947)

A Budai-hegységet felépítő rétegsor kialakulásának kezdete az alpi tectogenézis időszak elejére esik. A rendelkezésre álló gyér adatok alapján az azt megelőző időszakok földtani eseményeiről és képződményeiről csak vázlatos képet lehet alkotni (WEIN, 1977).

A felszínen megfigyelhető legidősebb triász képződmény a Budaörsi (diploporás) Dolomit, amely sötétszürke vagy világosszürke, sárgásfehér. Vékonyréteges vagy közepes rétegvastagságú, ciklusos felépítésű, határozott rétegződése általában nem látszik. Vastagsága a Budai-hegységben 1000-1200 méterre becsülhető (pl. HAAS, 1994). Felette laza, szemcsés dolomit települ, amelyet még a ladiniba (középső triász, Budaörsi Dolomit Formáció) helyez

a szakirodalom, majd a karni „raibli rétegek” (felső triász, Mátyáshegyi Mészko Formáció) következnek. Eddig az egész Budai-hegységben egyöntetű kifejlődésű a triász üledéksor.

A karniban (késő triász) differenciálódó üledékképződés eredményeként két késő triász kifejlődés keletkezett, a Földolomit és a Dachsteini Mészko Formáció. Átlagos vastagságuk 600-700 méter. A két fácies a legtöbb helyen hirtelen, nem szerkezeti vonal mentén érintkezik és egymással párhuzamosan ÉNy-DK-i irányban húzódik (WEIN, 1977).

A Budai-hegység triász rétegsora az óalpi fázis időszakában kialakult Tethys nyílt, melegtengeri karbonátos képződményeiből épült fel. Az üledékképződés egyenletességét a ladini (középső triász, Budaörsi Dolomit) után kialakuló fáciesövek keletkezésében megnyilvánuló oszcillációs mozgások szakítják meg. Az összlet fedőjében a Budai-hegység egész területén és a Vértes-hegységben a karni emeletbe besorolt „raibli márga” rétegei települnek. Barnásszürke, bitumenes dolomitmárga, szürke, vékonypados, helyenként tűzköves mészko és barnásszürke, széttöredező dolomit képződmények. A változatos összetételű dolomit-márga-mészko rétegsor nem vastagabb, mint 150 méter. Felszíni feltárásokban a klasszikus Mátyás-hegy-pálvölgyi felszíni és barlangi feltárás a legismertebb (SCHRÉTER, 1909).

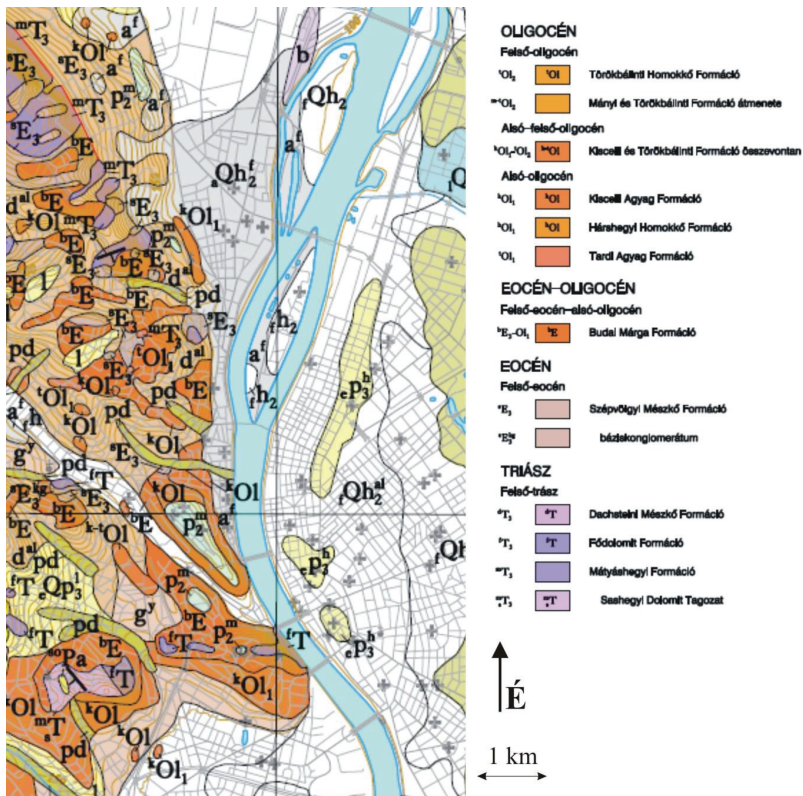
A Budai-hegységet az ÉNy felől előrenyomuló kora ill. középső eocén tenger még csak Nagykovácsi-Piliszentiván-Pilisvörösvár-Solymár vonaláig öntötte el. Az egykori partvonal, feltehetően törések mentén található, besüllyedő kisebb medencékben megindult az üledékképződés, ami eleinte terrigén lepusztulási termékekből, majd édes- és csökkentsósvízi képződményekből, végül tengeri operculinás agyagmárga lerakódásokból állt. A kora eocén után rövid regressziós időszak következett, amit a középső eocénben erőteljes transzgresszió váltott fel. A késő eocénben a mai Budai-hegységet a tenger teljesen elöntötte. A kora-eocénben kezdődő transzgressziós szakaszok legfelső ciklusát durva abráziós konglomerátum vezeti be. Az ezekre települt litorális jellegű nummulinás-discocyclinás mészkövet (Szépvölgyi Mészko) és – részben felette, részben azt helyettesíthető – bryozoás márgát (Budai Márga) az egész hegységben megtaláljuk. A késő eocén ciklus zárótagja az átlagosan 100 méter vastag, egyöntetű kifejlődésű, sárgásbarna Budai Márga (4. ábra). A hegység keleti részén fokozatos átmenete nyomozható a tardi rétegekbe (Tardi Agzag Formáció) (WEIN, 1977, NAGYMAROSY et al, 1986).

A hegység keleti, délkeleti részén, ott ahol az üledékképződés folyamatos volt (Tardi Agzag), az oligocén rétegek fácies-diszkordanciával, az északi és nyugati területeken diszkordánsan, üledékhézaggal települnek a triász vagy eocén rétegekre.

A bázisképződményekre települ a keleti területeken a kékesszürke, igen gazdag és jellegzetes Foraminifera faunát tartalmazó, mélyebb (300-400 m) tengeri kifejlődésű Kiscelli Agyag (HANTKEN 1866, 1868, BÁLDI, 1983).

Az oligocén után a Budai-hegység szárazulattá vált és a korai miocénben szigetként, a szarmatától kezdve félszigetként emelkedett ki a tengerből. Alsó pannóniai rétegeket a Budai-hegység területén nem ismerünk. A felső pannóniai üledékes sorozat mintegy 60 méter vastag finom kvarckaviccsal és homokkőpados homok rétegekkel kezdődik. Felette finomhomokos szürke agyag és világosszürke agyag váltakozó rétegei települnek (WEIN, 1977).

A pliocén végén és a pleisztocén elején a Budai-hegység területe száraz volt. Tulajdonképpen ekkor kezd kialakulni a Budai-hegység mai morfológiai arculata. Tektonikai szempontból két csoportra bonthatók a pleisztocén és holocén képződmények. Az egyikbe a travertínó, azaz a hévforrások táplálta tavak főleg mésziszap lerakódásai, az édesvízi mészkő, a másik csoportba az „egyéb” eolikus, fluviális és lepusztulási termékek tartoznak (WEIN, 1977).



4. ábra: A vizsgált terület fedett földtani térképe

(forrás: Gyalog, 2005)

3.1. A rózsadombi barlangok és kialakulásuk

A Budai-hegység mintegy kétezer méter vastag karbonátos kőzettömegében csaknem háromszáz barlang és mesterséges üreg ismert (TERMÉSZETVÉDELMI HIVATAL, BARLANGNYILVÁNTARTÁS). Ezek közül több mint száz a késő ecocén Szépvölgyi Mész-kőben és Budai Márgában található (LEÉL-ÖSSY, 1995). A maradék nagy részét triász formációk (Budaörsi Dolomit, Mátyáshegyi Mész-kő Formáció, Földolomit és Dachsteini Mész-kő) tartalmazzák. Kevés kisméretű barlang található a késő miocén Tinnyei Formáció „durvamész-kőjében” és a pleisztocén édesvízi mész-kőben (KORPÁS, 2000).

A barlangok (definíció szerint) a Föld szilárd kérgében, természetes úton keletkezett, ember számára járható méretű üregek. Magyarországon jelenleg a 2 m-nél hosszabb üregeket tekintjük barlangnak (KRAUS, 1999), amelyek a természet védelméről szóló 1996. évi LIII. számú törvény alapján védelem alatt állnak. A tíz legjelentősebb barlang fokozottan, s mintegy további harminc pedig megkülönböztetett módon védett. A barlangok jelentős része és a hozzájuk tartozó felszíni terület is valamilyen fokon védett (Világörökség, Tájvédelmi Körzet, Természetvédelmi Terület, Védett érték, Hidrológiai védőterület). A természet védelméről szóló törvény értelmében minden olyan tevékenység, amely állapotváltozást idézhet elő barlangjainkban engedélyhez kötött, így különösen a Vidékfejlesztési Minisztérium jogelődje, az akkori Környezetvédelmi és Területfejlesztési Minisztérium 13/1998. évi rendeletében meghatározott barlangok látogatása, a kutatás, bűvárműködés, kiépítés és hasznosítás, valamint az ásványok kimentése, hasznosítása és külföldre juttatása (SZÉKELY, 2000, in KORPÁS, 2000).

A jogszabályok mellett a barlangok lezárása nemcsak az értékek megóvását, de sok esetben az élet védelmét is szolgálják. A védett barlangoknak mintegy harmadában műszaki megoldások akadályozzák az illetéktelen behatolást (SZÉKELY, 2000, in Korpás 2000).

Barlangok kialakulhatnak a befogadó kőzetekkel egyidejűen (szingenetikusan) és létrejöhetnek utólagosan, már kialakult kőzetekben. Ez utóbbi folyamatot posztgenetikus barlangképződésnek hívjuk, amely során tektonikai mozgások, a víz oldó és koptató hatásának és a szél munkájának eredményeképpen alakulnak ki üregek. A földkéreg összes ismert barlangjának 96 %-a valamilyen formában a víz hatására alakult ki (KORDOS et al, 1984). A budai-hegységi barlangok mind kőzetkeletkezés után, másodlagosan keletkezett, hasadékbarang-rendszerek, amelyeket későbbi melegvíz-feltörések tágitottak sajátos módon még tovább (KORDOS et al, 1984).

A rózsadombi barlangok kialakulásában a tektonikus preformációnak döntő szerepe volt, a leggyakoribb tektonikai irányok: Ény-DK, NyÉny-KDK, K-Ny, ÉK-DNy és ÉD a barlangjáratok irányával jól nyomonkövethető (LEÉL-ÖSSY, 1995).

A hévizes üregesedés alapvető folyamata a keveredési korrózió. A terület viszonylag erősen tektonizált volta, a repedésrendszerek kialakulása és a tektonikus hasadékok lehetővé tették a lefelé szálló (descendens) hideg, illetve a felszálló (ascendens) meleg vizek keveredését és így létrejöhetett a keveredési korrózió zónája, ami az üregrendszerek képződéséhez vezetett. Az elmélet szerint a különböző, eltérő hőmérsékletű és ionkoncentrációjú oldatok keveredésekor a létrejövő oldat akkor is agresszív, oldóképes lehet a mészkőre nézve, ha a kiinduló oldat telített volt CaCO_3 -ra nézve. Ez az oldóképeség addig áll fenn, míg a kevert

oldat is el nem éri az egyensúlyi állapotot. Az eltérő ionkoncentrációban a CO₂ parciális nyomásának van a legfontosabb szerepe (BÖGLI, 1964).

Abban a zónában, ahol az aszcendens és deszcendens vizek találkoznak a keveredés szinte folyamatos, ezért az oldódás is sokáig fennáll (TAKÁCS-BOLNER & KRAUS, 1989; LEÉL-ÖSSY 1995; LEÉL-ÖSSY & SURÁNYI, 2003). Így alakulhatnak ki több tíz méteres vízszintes óriástermek (pl. Pál-völgyi-barlang Színház- és Tollas terme) (LEÉL-ÖSSY, 1995). A melegvizes oldatok csak a kőzetek repedéseiben közlekedhettek és közlekednek ma is és tízezer évek alatt a kőzet vízvezető repedéseit barlangjáratokká alakítják, a mélyből hiányzó anyagot pedig a felszínre lépő vizek édesvízi mészkő (mésztufa) formájában rakják le a források térségében (TAKÁCSNÉ BOLNER, 2000).

A Budai Termálkarszt azonban a domináns barlangképződési folyamat alapján legalább két részre osztható: a déli (Gellért-hegy) és északi (Rózsadomb) rendszerre. Radionuklidok segítségével sikerült igazolni, hogy a rózsadombi barlangok kialakulásában a keveredési korrózió játssza a fő szerepet, a Gellért-hegy esetében azonban a keveredés nem bizonyított (ERÖSS et al., 2012).

A középső- és újpleisztocén folyamán a barlangképződési szakaszban nagyrészt a Szépvölgyi Mészkőben húzódott a keveredési zóna, ezért alakult ki itt a rózsadombi barlangjáratok többsége, bár ez a kőzet több százalékkal nagyobb agyagtartalma miatt kevésbé alkalmas karsztosodásra, mint a triász Mátyáshegyi Mészkő (4. ábra) (LEÉL-ÖSSY, 1995).

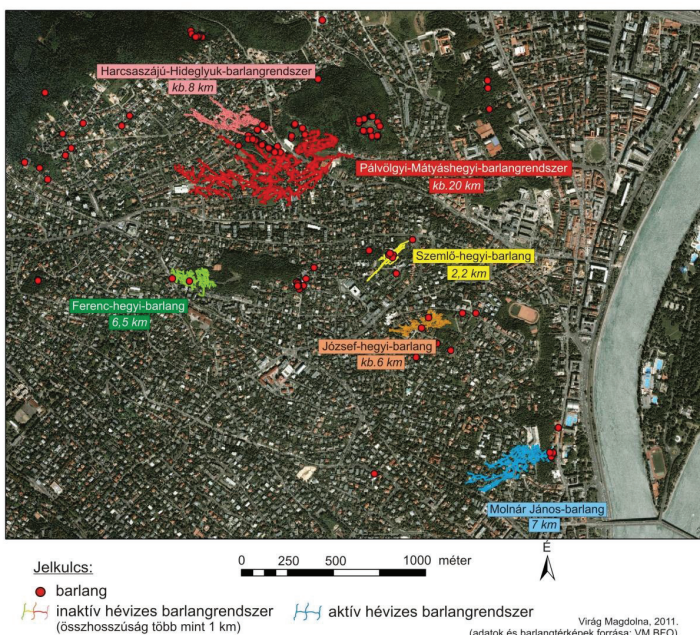
Az eocén Szépvölgyi Mészkő viszonylag sok oldási maradékát (agyag) részben a felszínre tudja szállítani a víz. Így a mészkő felett található márgában is kialakulhatnak forráskürtők. A mélyből feltörő melegvizek szilárd hordalékot nem szállítanak, így ezekben a barlangokban gyakorlatilag csak az oldás (korrózió) dolgozik. Különleges oldásos formák alakulnak ki, amelyek minden közettni változást kihangsúlyoznak. Az üregek alakja gömbölyű formákból tevődik össze, amit azonban a repedések, a réteglapok és a kőzetet átjáró, kevésbé oldódó kalcittelérek erősen befolyásolnak. A hévizes barlangok járatai vízvezető repedésekhez kötötten alakulnak ki. Mivel a feláramlás eleinte nagy területen gyakorlatilag egyenletesen történik, több, közel egyenlő jelentőségű (és méretű) rés fog kitágulni; kialakul a jellemző hálózatos alaprajz. A járatok hasadékjellegűek, többnyire magasak, keskenyek. Felső záródásuk hasadék, vagy gyakran gömbfülke, ami a víz áramlása során alakul ki (KRAUS, 1999).

A kialakult járatméretek természetesen nemcsak a kőzetminőségnek, hanem a barlangokat létrehozó vizek oldóhatásának is függvényei (LEÉL-ÖSSY, 1995). A barlangok arculata sokat

változik a szárazzá válás után. Pusztuló fázisba kerülnek, agyagbemosódás, eltömődés és omlások jellemzőek rájuk (LEÉL-ÖSSY, 1995).

3.2. Vizsgált barlangok

Budapest a világ egyetlen olyan fővárosa, amelynek lakóterülete alatt jelentős kiterjedésű, látványos képződményekkel díszített barlangrendszerek találhatók (5. ábra), amelyek nem csak elhelyezkedésük, de kialakulásuk tekintetében is különlegesek. Ez a közel 200 barlang a budai hévforrástevékenység mintegy 2 millió éves múltjába kínál betekintést (TAKÁCSNÉ BOLNER, 2000).



5. ábra: Budai-hegységi barlangok elhelyezkedése és kiterjedése (a barlang neve alatti szám a barlang 2011-ben ismert hosszát jelzi)

(forrás: Virág et al., 2011).

3.2.1. A Pál-völgyi-barlang története

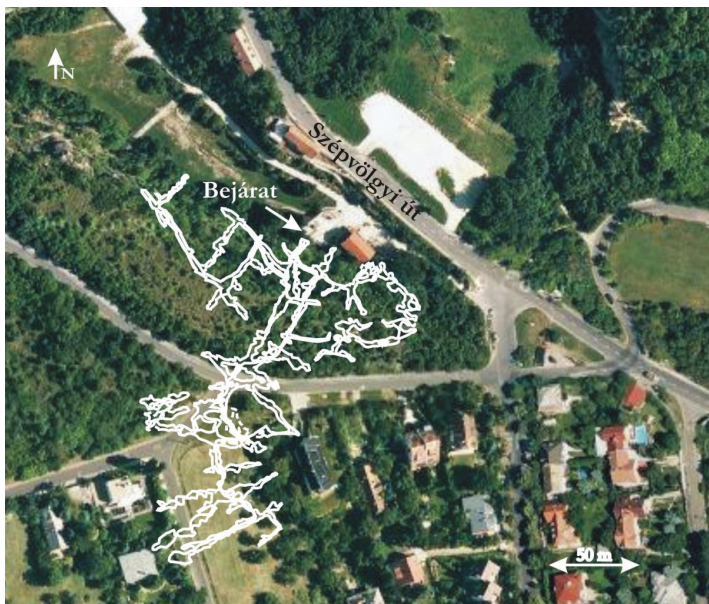
A Hármashatár-hegycsoport lábánál elterülő Szépvölgy-Rózsadomb (6. ábra) felszíne alatt rejtőző barlangok létezéséről a XX. század elejéig semmit sem tudtunk. Felfedezésük a főváros terjeszkedésének köszönhető. A mai Szépvölgyi út 162. szám alatt nyíló hajdani

köfőjtőben 1904. június 23-án tárult fel a Pál-völgyi-barlang Scholtz Pál Kornél tisztviselő és Bagyura János, az akkoriban működő mészkőbánya felügyelőjének fia előtt. A szerteágazó járatok teljes felderítése érdekében itt meginduló rendszeres kutatómunka egyben a hazai feltáró barlangkutatások kezdetét is jelentette (TAKÁCSNÉ BOLNER, 2000).

A feltárult, szövevényes járatrendszer első térképét Kadić Ottokár készítette el 1917-1919 között. A bányakompasz és mérőlécek segítségével végzett felmérési munkák 35 napot igényeltek. Az első látogatói statisztikák 1920-ból maradtak fenn, ekkor 1564 látogató, köztük 461 hölgy és 48 gyermek kereste fel a barlangot. 1927-ben az első német-magyar barlangkutató konferencia tiszteletére, bevezetésre került a barlangban a villanyvilágítás. A barlang 1933-tól már állandó túravezetővel, hétköznapi is üzemelt. A második világháború során a környékbeliek a barlang járatait óvóhelyként használták, ezért jelentős állapotromlás következett be. Az első komolyabb helyreállításra csak 1963-64-ben került sor. A természetvédelem első önálló szervezetének létrejöttével a barlangot 1973-ban az Országos Természetvédelmi Hivatal vette kezelésébe. A Pál-völgyi-barlang kiépített része ma a Duna-Ipoly Nemzeti Park Igazgatóság által 1997-2001 között elvégzett teljes rekonstrukció állapotában látható (TAKÁCSNÉ BOLNER, 2000).

3.2.2. A Pál-völgyi-barlang geológiája

A barlang túlnyomó része a Szépvölgyi Mészkő Formációban található, egyes magasabbra nyúló járatai azonban a mészkövet fedő vékonypados Budai Márga Formációt is eléri (TAKÁCSNÉ BOLNER, 2000). A Pál-völgyi-barlang esetében az ÉK-DNy, ÉNy-DK, és a KDK-NyÉNy-i tektonikai irányok a döntőek (LEÉL-ÖSSY, 1995). A Pál-völgyi-barlangban sok cseppkőfolyással, függő és álló cseppkővel, szép kalcitkristályokkal és heliktitekkel is találkozhatunk. A szerényebb méretű, többnyire recens keletkezésű gipszkristályokon kívül az agyagkitöltések csepegéshyomai és száradási repedései jelentik a barlang fő értékét, emellett látványos oldásformákat és kovás teléreket is sokfelé láthatunk (LEÉL-ÖSSY, 1995). A barlang élővilága szegényes, faunájának legjelentősebb képviselői a denevérek, amelyek közül átlagosan 120-150 példány használja rendszeres téli szálláshelyül a járatokat (TAKÁCSNÉ BOLNER, 2000). A vizsgált Pál-völgyi-barlangot 1944-ben (azaz jóval a magyarországi barlangok általános védelmének 1961. évi kimondása előtt) nyilvánították természetvédelmi területté; s ugyancsak az első között lépett – 1982-ben, e fogalom bevezetésekor – hazánk fokozottan védett természeti értékeinek sorába (TAKÁCSNÉ BOLNER, 2000).



6. ábra: A Pál-völgyi-barlang területéről készített műholdfelvétel. A fehér görbék a barlang általunk vizsgált szakaszának elhelyezkedését jelölik.

(barlangtérkép forrása: Vidékfejlesztési Minisztérium, Barlang- és Földtani Osztály)

3.2.3. A Molnár János-barlang története

Budapest belterülete alatt, a II. kerület szívében, a József-hegy mélyében húzódik a Molnár János-barlang (7. ábra) (LEÉL-ÖSSY et al, 2011). A József-hegy lábánál fakadó forrásokat már a rómaiak is ismerték és használták, amit számos régészeti lelet között egy Claudius idejéből származó felirat is bizonyít: „*aqua calidae superiores et inferiores*”, azaz alsó és felső meleg vizeket említ (KORDOS et al, 1984). A barlang vizét ugyanis a mélyből feltörő meleg, valamint a Budai hegyek felől áramló hideg karsztvízből kapja. A víz hőmérsékletét a kétféle víz keveredésének mértéke határozza meg (KALINOVITS 2000 in Korpás 2000), ami így a víztükör közelében 23-26 °C-os, 25-35 méteres mélységben pedig ~19 °C (ERŐSS et al., 2008).

A Malom-tó valószínűleg már a középkorban is létezett, a József-hegy lábánál feltörő források körül épített gáttal duzzasztották, amire azért volt szükség, mert a források és a Duna közötti területen vízimalmok működtek. A tavat két forrás táplálja. Az egyik az ún. Boltív-

forrás, amely a jellegzetes boltív alatt fakad, a másik forrás az ún. Alagút-forrás (KORDOS et al, 1984).

A Malom-tóhoz kapcsolódó Molnár János-barlang létezéséről először az Orvosi Hetilap 1858. évi 33. számában találunk említést (KORDOS et al, 1984). A barlang névadója, Molnár János patikus anélkül írta le a barlangot, hogy látta volna. A Malom-tó közelében lakott és érdekelte, hogy honnan származik a tó vize. Ismert egy üreget a hegy oldalában, amely egy apró járáshoz, az pedig egy tóhoz vezetett. A Malom-tóból és a barlangi tóból vett vízminták azonos kémiai összetétele alapján feltételezte, hogy a két mintavételi hely között összefüggésnek kell lennie. Több mint száz év telt el, míg ezt a néhány tíz méteres távolságot átúszva felfedezték a barlangot (PLÓZER, 1974).

A bozótos domboldalon, 12 méterrel a Malom-tó vízszintje felett egy kisméretű, hajdan lezárt, de ma nyitott kis barlangbejáraton keresztül lehet leereszkedni a barlangot szinte 100 %-ban kitöltő langyos karsztvíz szintjéig. Az ingatlan szélén 1977-ben hajtottak egy vízszintes, átlag 3 m átmérőjű alagutat, 180 m hosszban, mintegy 3 m-rel a karsztvíz szintje felett. A táró 83. méterénél nyílik egy 7 méteres keresztfolyosóból a 2008-ban megnyitott, a Kessler Hubert-terembe vezető, 9 m hosszú kis segédjáró (LEÉL-ÖSSY et al, 2008), amelyen keresztül a legkényelmesebben közelíthető meg a barlang belseje. A táró 60. méterénél nyíló, kb. 40 m hosszú Szt. Lukács-kristálybarlang is a Molnár János-barlang része.

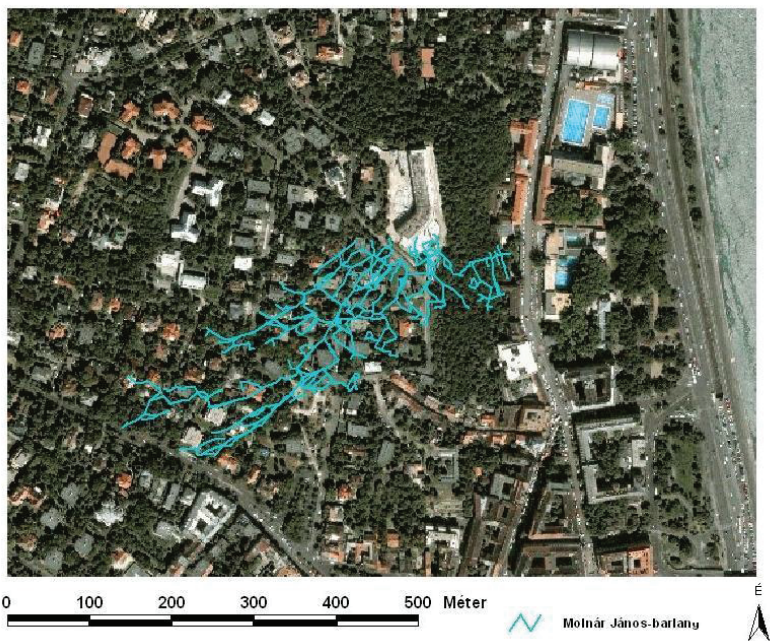
3.2.4. A Molnár János-barlang geológiája

A Molnár János-barlang járatai az eocén kor vége felé keletkezett Szépvölgyi Mészköben és a rétegsorban azt fedő Budai Márga bryozoás márga tagozatában oldódtak ki, a többi rózsadombi barlang képződményein végzett urán-soros korhatározások eredményei alapján alig néhány tízezer éve. A folyosók sokszor a két kőzetformáció határát is jelzik: alsó részük a mészköbe, felső részük a márgába mélyül (LEÉL-ÖSSY et al, 2011).

Az intenzív feláramlás, ill. keveredés miatt azonban a Molnár János-barlang folyosóira a budai viszonylatban szokatlanul nagy méretek a jellemzők: nem ritkák a 10 m szélességű, illetve a még magasabb folyosók. A már említett 23 000 m³-es Kessler Hubert-terem alighanem a világ legnagyobb termálkarsztos keletkezésű barlangterme. 90 %-ban víz tölti ki, egy 10 m magas kupola borul a kb. 20 m átmérőjű, 23-26 °C-os vizű tó fölé. Mind a víz alatti járatokban, mind a Kessler-teremben a tó fölött számtalan korróziós gömbüstöt (10-30 cm átmérővel) és egyes esetekben gömbfülkét (akár több m átmérőjűeket) figyelhetünk meg. A Kessler-terem oldalában a falkőzet – ami márga - kissé oxidálódott és sárgás színezetű lett. A barlangterem falán néhány mm vastagságban agyag borítja a kőzetet, ahol a karbonát tartalom

kioldódott belőle. A tó fölött 1-1,5 m magasságig fekete, mangánoxidos, lehetővékony bevonat fedi a kőzet felszínét. A barlang hátsó járatai már 100 méternél is mélyebben húzódnak a felszínhez képest. Ismert járatainak hossza ma már kb. 7,5 km (LEÉL-ŐSSY et al., 2011).

A barlang fokozottan védett természeti kincs és egyben a Lukács-fürdő víznyerő helye is (KALINOVITS 2000 in Korpás, 2000). A keveredési korrózió övében elhelyezkedő barlangrendszer jelentős kulcs a többi rózsadombi barlang genetikájának megértéséhez (LEÉL-ŐSSY, 1995).



7. ábra: A Molnár János-barlang területéről készített műholdfelvétel. A kék görbék a barlang térképre vetített poligonját jelölik.

(forrás: Virág (2010) in Trásy 2010)

3.2.5. Hideg-lyuk

A Pál-völgyi-kőfejtő üregeihez tartozó, most már a Szépvölgyi-barlangrendszer részét képező 170 m hosszú Hideg-lyuk elágazó, tágas barlangrendszer ami a kőfejtő északi sarkában a bányatalpon húzódik (5. ábra). A barlangrendszert alkotó többi barlanghoz hasonlóan a

Hideg-lyuk is az eocén Szépvölgyi Mészkőben és a Budai Márgában húzódik (Kiss Attila szóbeli közlése alapján). Helyenként szerényebb méretű cseppkőképződmények találhatók benne, tágas, oldott folyosóit itt-ott omladékos termek tagolják. Nevét a bejáratnál érezhető, kifelé áramló erős huzatról kapta (LEÉL-ÖSSY, 1995).

3.2.6. Harcsaszájú-barlang (Déry-barlang)

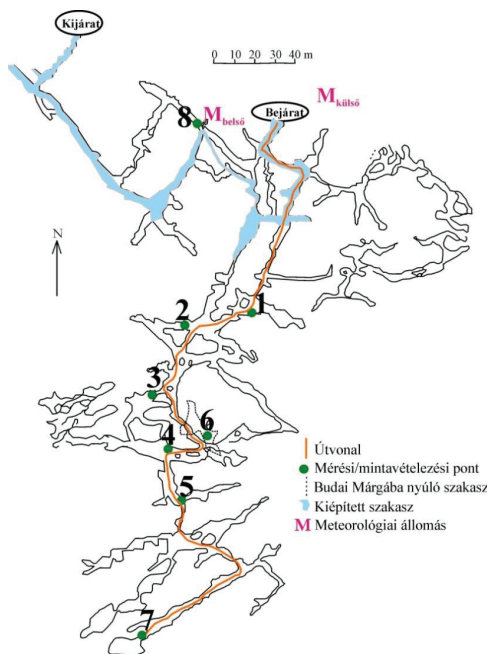
Szintén a Szépvölgyi-barlangrendszerhez tartozik a 310 méter hosszú, a Budai-hegység egyik cseppkőekkel legjobban díszített barlangja, a Szépvölgyi Mészkőben és Budai Márgában (Kiss Attila szóbeli közlése alapján) kioldódott Harcsaszájú-barlang (5. ábra). Nevét jellegzetes 5x5 méteres bejáratáról kapta. A nyitott harcsaszájra emlékeztető bejárata egy meredeken lejtő, folyamatosan szűkülő „V” alakú hasadékbá torkollik (LEÉL-ÖSSY, 1995).

4. MINTAVÉTELEZÉS

4.1. Mintavételezési helyszínek

4.1.1. Pál-völgyi-barlang

Ahhoz, hogy a bevezetésben leírt célokat elérjük és megvizsgáljuk a barlangi levegő radonkoncentrációjának időfüggését illetve forrásait, több mérési és mintavételezési pont kijelölésére volt szükség a kiválasztott budai-hegységi barlangokban. A doktori kutatás mind befektetett időben, mind befektetett munkában a Pál-völgyi-barlangra koncentrált leginkább, ezért itt található a legtöbb (összesen 8 db) mérési/mintavételezési pont (8. ábra).



8. ábra: A Pál-völgyi-barlang vizsgált szakasza.

A kék terület a kiépített részt, a narancssárga útvonal az általunk bejárt szakaszt, a zöld pontok a mérési/mintavételezési pontokat jelölik.

(barlangtérkép forrása: Vidékfejlesztési Minisztérium, Barlang- és Földtani Osztály)

A radonkoncentráció időfüggésének vizsgálatához egy olyan pontot kerestünk, ahol még van időbeli változás, tehát nincs túlságosan mélyen (kb. 50 m), de már nem a kiépített szakaszon található. A korábban a barlangban végzett nyomdetektoros radonkoncentráció vizsgálatok alapján (Bekey Imre Barlangkutató Csoport évi jelentések 1990-1997) a PM 4 jelű mérési pontot (2. ábra) választottam ki a hosszú távú (2009.10.27-2011.02.22) radonkoncentráció monitorozásra. Ez a pont tehát már a kiépítetlen szakaszon van, így lehetőséget nyújt a zavartalan mérésre, de még elég közel (a kiépített szakasz végétől kb. 100 méterre) található a felszínhez ahhoz, hogy az áramellátást problémamentesen biztosítani tudjuk (8. ábra, általunk 2. mérési ponttal jelzett).

A radonkoncentráció forrásának meghatározása érdekében több mérési ponton mintavétel (barlangi agyag, csepegő víz), illetve egyéb mérés (barlangi agyag pórusainak radonkoncentrációja, levegő radonkoncentrációjának rövid távú mérése RAD 7 radon

detektorral, levegő radonkoncentrációjának hosszú távú mérése passzív nyomdetektorral több ponton, párhuzamosan) történt. A barlangi agyagból öt ponton volt lehetőségünk mintavételre, ahol az agyagréteg kellően vastag volt, ezek a 2., 3., 5., 6. és 7. pontok (2. táblázat). Csepegő vízből mintát a 2., 3., 6., 7. pontok közelében tudtunk gyűjteni, így a vízmintavételi pontokat is ezekkel a számokkal jelöltük. A barlangi agyag pórusaiban lévő levegő radonkoncentrációját a 2., 5., 6. és 7. mérési pontokon határoztuk meg, a 2. és 5. mérési ponton ahhoz is elég vastagságú volt az agyag, hogy egy-egy fúrást mélyítsünk 125, illetve 200 cm-es mélységig (2. táblázat). A barlangi levegő radonkoncentrációjának időbeli változásait aktív radon detektorral a 2. (AlphaGuard műszer) és a 3. 5. 6. mérési pontokon (RAD 7 radondetektor) vizsgáltam egy rövid idejű méréssel. Ezeken kívül 2010. november 23. és 2012. január 17. között átlagosan kéthavonkénti cserével az 1., 2., 3., 4. és 5. pontban helyeztünk el passzív nyomdetektorokat, 2011. 01. 12-től a 8. ponttal, 2011. 02. 22-től a 6. és 7. ponttal egészültek ki a mérések.

	minta	mintavételezés módja	fizikai vizsgálatok	ásványtani vizsgálatok
1. pont	barlangi levegő	nyomdetektor, 2010.11.23-2011.11.15		
2. pont	agyag (PB2A)	kézi ásó	Rn-E, ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K akt.	SEM, RTG-diff., szemcseméret
	agyagfúrás (PB2F1), 3 db minta	talajfűrő, 125 cm	Rn-E, ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K akt.	szemcseméret
	kőzet (mészkö)		Rn-E, ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K akt.	SEM
	póruslevegő	talajszonda, 30 cm	C_{Ra}	
	barlangi levegő	nyomdetektor, 2010.11.23-2011.11.15	C_{Ra}	
		AlphaGuard, 2009.10.17-2011.02.22.		
	csepegő víz	fecskendő	oldott Rn-tart.	
3. pont	agyag (PB3A)	kézi ásó	Rn-E, ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K akt.	SEM, RTG-diff., szemcseméret
	barlangi levegő	nyomdetektor, 2010.11.23-2011.11.15	C_{Ra}	
	csepegő víz	fecskendő	oldott Rn-tart.	
4. pont	barlangi levegő	nyomdetektor, 2010.11.23-2011.05.24	C_{Ra}	
		nyomdetektor, 2011.07.21-2011.11.15	C_{Ra}	
5. pont	agyag (PB5A)	kézi ásó	Rn-E, ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K akt.	SEM, RTG-diff., szemcseméret
	agyagfúrás (PB5F1), 5 db minta	talajfűrő, 200 cm	Rn-E, ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K akt.	szemcseméret
	"kőzet"(kalcit)		Rn-E, ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K akt.	
	póruslevegő	talajszonda, 55 cm	C_{Ra}	
	barlangi levegő	nyomdetektor, 2010.11.23-2011.11.15	C_{Ra}	
	csepegő víz	fecskendő	oldott Rn-tart.	
6. pont	agyag (PB6A)	kézi ásó	Rn-E, ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K akt.	SEM, RTG-diff., szemcseméret
	kőzet (marga)		Rn-E, ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K akt.	SEM
	póruslevegő	talajszonda, 70 cm	C_{Ra}	
	barlangi levegő	nyomdetektor, 2011.02.22-2011.11.15	C_{Ra}	
7. pont	agyag (PB7A)	kézi ásó	Rn-E, ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K akt.	
	póruslevegő	talajszonda, 70 cm	C_{Ra}	
	barlangi levegő	nyomdetektor, 2011.02.22-2011.11.15	C_{Ra}	
	csepegő víz	fecskendő	oldott Rn-tart.	
8. pont	barlangi levegő	nyomdetektor, 2011.01.12-2011.11.15	C_{Ra}	

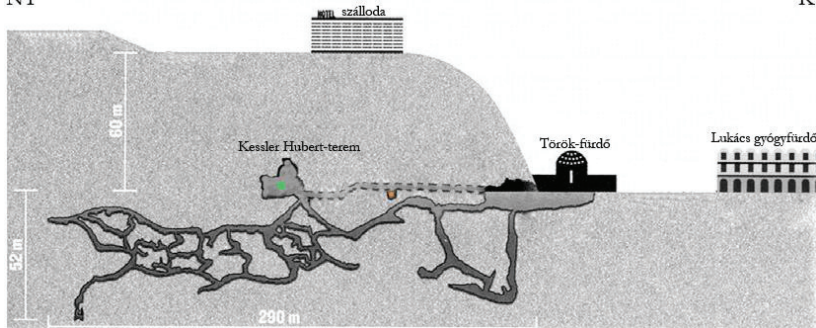
2. táblázat: A Pál-völgyi-barlangban gyűjtött mintákat és az azokon elvégzett vizsgálatokat összefoglaló táblázat. A vizsgálatok rövidítései: Rn-E: radon kibocsátás, ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K akt.: ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K izotópok fajlagos aktivitása, SEM: pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálat, RTG-diff: röntgen poriffrakció vizsgálat

A meteorológiai paraméterek nyomonkövetése érdekében két meteorológiai állomást is elhelyeztünk. Az egyik a szabad levegőre, a barlang bejáratától 5-10 méterre, a barlangot kiszolgáló épület tetejére került, a másik a barlangon belül, a felszínhez közel, egy természetes szellőzőnyílás (hasadék) mellé, ahol a meteorológiai paraméterek változása még megfigyelhető. A 8. ábrán a 8. pont mellett lévő $M_{\text{belső}}$ jelölés a barlangon belül elhelyezett állomásra, a másik: $M_{\text{külső}}$ a szabadban elhelyezett külső meteorológiai állomásra utal.

Az összes pont a barlang kiépítetlen részén helyezkedik el, turisták számára nem látogatható, közülük egy, a 6. pont egy felső járatban található, amelyik felnyúlik a Budai Márgába, a többi a Szépvölgyi Mészkőben van.

4.1.2. Molnár János-barlang

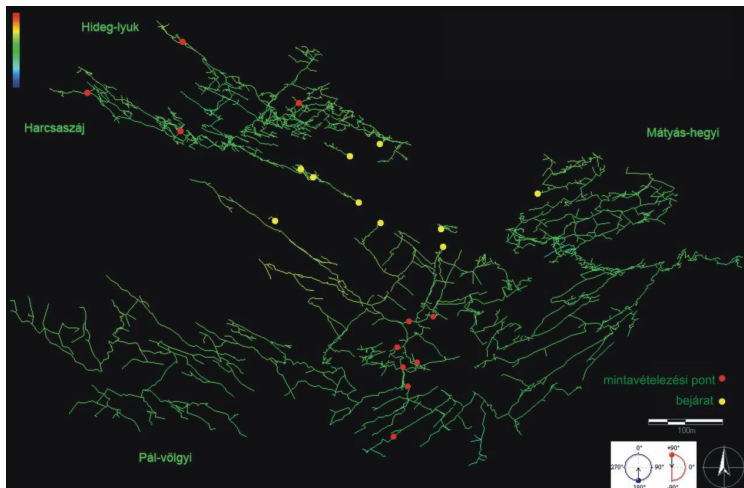
A Molnár János-barlang egy ma is formálódó, aktív hévizes barlang, járatainak nagy része víz alatt található. Búvárfelszerelés nélkül egy nagy terme, a már említett Kessler Hubert-terem (9. ábra) közelíthető meg, ami Budai Márgában húzódik, illetve a teremhez vezető mesterségesen épített táró két oldalán találhatunk még egy-két kisebb természetes üreget (pl. Szent Lukács-barlang). A Kessler Hubert-teremben a víztér közvetlen közelében egy ponton helyeztünk el nyomdetektort, amelyet havonta cseréltünk 2011. 07. 19-2012. 02. 21. között. Szintén havonta vettünk vízmintát, illetve 2011. 07. 19-én egy víz alatti agyagmintát is begyűjtöttünk, amelynek szárítás után meghatároztuk a radon kibocsátását, fajlagos ^{226}Ra , ^{232}Th és ^{40}K aktivitását. 2011. 11. 17-2012. 02. 21. között a Kessler Hubert-teremhez vezető táróból nyíló egyik üregben (Szent Lukács-barlanggal szemben lévő kisebb Budai Márgában húzódó üreg) vizsgáltuk a radonkoncentráció időbeli változásait AlphaGuard radon monitorral egy órás integrációs időközszel.



9. ábra: A Molnár János-barlang 2007-ig feltárt szakaszainak vázlatos alaprajza. A szaggatott vonal mesterséges tárót jelez. A zöld pont a kihelyezett nyomdetektorok, a narancssárga pont az AlphaGuard radonmonitor megközelítő helyét jelöli (SURÁNYI et al., 2010 után módosítva)

4.1.3. Hideg-lyuk, Harcsaszájú-barlangok

A Hideg-lyuk és Harcsaszájú-barlangokból agyagmintákat gyűjtöttünk (10. ábra), hogy meghatározzuk azok ^{226}Ra , ^{232}Th és ^{40}K tartalmát, illetve radon-és toron kibocsátását, és az eredményeket összehasonlítsuk a Pál-völgyi és Molnár János-barlangból gyűjtött agyagminták eredményeivel.



10. ábra: A Hideg-lyuk és Harcsaszájú-barlangokban gyűjtött agyagminák mintavételezési pontjai a Szépvölgyi-barlangrendszerben

(barlangtérkép forrása: Vidékfejlesztési Minisztérium, Barlang- és Földtani Osztály)

4.2. Mintavételezési módszerek

4.2.1. Szilárd minták

Szilárd minták közé a következők tartoznak: barlangi agyag a felszínről, barlangi agyag fúrásból, barlangban vett kőzetminta és kőzetalkotó. Ennek megfelelően a szilárd anyagok mintavételezése háromféle módon történt.

Mintavétel kézi ásóval

Ebben az esetben a felső, kb. 20 cm-es agyagrétegből vettünk legalább kb. 1 kg mennyiségű anyagot. A mintákat zacskóba tettük és laboratóriumban kerámia edényben szobahőmérsékleten szárítottuk két-három hétig (mivel a nedvességtartalom befolyásolja a radon kibocsátást). A mintáknak száradás után meghatároztuk a radon kibocsátását és a ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K tartalmát. A Molnár János-barlangból származó minta esetében az agyagot a víz alól vettük kézi ásóval egy olyan pontról, ahol az agyagréteg elérhető volt.

Mintavétel fúrással

Szilárd anyagok mintavételezésének másik módja a földtani kutatásban gyakran használt talajfúrás. A használt fúró kézi hajtású, rozsdamentes acélból készült, maximum 4,5 méteres mélységig használható és talajokra, laza üledékekre, agyagokra alkalmazható. A Pál-völgyi-barlangban két mérési ponton (2. és 5. mérési pont) mélyítettünk fúrást, 125, illetve 200 cm-es mélységig. A mintákat (11. ábra) fizikai tulajdonságaik alapján választottuk szét és az előzőekben leírtakhoz hasonlóan laboratóriumban kerámia edényben szobahőmérsékleten szárítottuk, száradás után a minták radon kibocsátását, ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K tartalmát határoztuk meg.



11. ábra: a, Barlangi agyagos kitöltés mintavétel kézi ásóval a Pál-völgyi-barlangban



b., Barlangi agyagos kitöltés mintavétel fúrással a Pál-völgyi-barlangban

Kőzet-mintavétel

Kőzetmintákat (kőzetalkotót) egyedül a Pál-völgyi-barlangból vizsgáltunk. Mivel a barlang 1944. óta természetvédelmi terület, 1982-től kezdve pedig hazánk fokozottan védett

természeti értékei közé tartozik (TAKÁCSNÉ BOLNER, 2000), a kutatás során mi is igyekeztünk maximálisan megővni. Ennek megfelelően kőzetmintákat nem friss törési felületekről, a barlang falából vettünk, hanem a korábban letört, leesett kőzetmintákat gyűjtöttük be, azzal a feltételezéssel élve (Kiss Attilával, a Pál-völgyi-barlang igazgatójával konzultálva), hogy a minták a keletkezési helyükön maradtak (vagyis sem természetes, sem mesterséges hatás következtében nem mozdultak el). A barlang a nummuliteses Szépvölgyi Mészkőben és a bryozoás Budai Márgában húzódik, így ebből a kétfajta kőzetből próbáltunk mintákat gyűjteni. Ezen kívül az egykori vízszintet jelző kalcit lemezekből is gyűjtöttünk mintákat. A könnyebb érthetőség kedvéért a dolgozatban az eredmények tárgyalása során a kalcit lemez eredményeit is a kőzetekhez sorolom.

4.2.2. Vízminták

Vízminták oldott radontartalmának meghatározásához a mintákat fecskendővel vettük és a vizet 20 ml-es küvettába fecskendeztük, amelybe előzetesen 10 ml Optifluor-O folyadékszcintillációs koktélt töltöttünk. A küvettákat parafilmmel légmentesen lezártuk, elláttuk egyedi jelzéssel és 3-4 napon belül lemértük. A Pál-völgyi-barlangból származó vízminták a barlangba beszivárgó, csepegő vizek, a Molnár-János barlangból gyűjtött vízminták a barlangot kitöltő termálvízből származnak.

5. VIZSGÁLATI MÓDSZEREK

5.1. Helyszíni mérések

5.1.1. Meteorológiai paraméterek vizsgálata

A meteorológiai paraméterek monitorozásához egy FWS 20 típusú, rádióvezérelt meteorológiai állomást használtunk (12. ábra), amely a szélirány, szélsébség, hőmérséklet, relatív páratartalom, légnyomás és csapadékmennyiség mérésére alkalmas. Ezek közül a hőmérséklet-, relatív páratartalom- és légnyomásértékeket használtuk fel. Az állomás egy kültéri és egy beltéri egységből áll, a kültéri egység mérési tartományai a következők:

hőmérséklet: -40-+65 °C (kijelzés: 0,1 °C);

relatív páratartalom: 1-99 % (kijelzés: 1 %);

csapadékmennyiség: 0-9999 mm (kijelzés: 0,1 mm);

szélsébség: 0-180 km/h.

A mérési intervallum tetszőlegesen választható 5-250 perc között. A memória összesen 4080 adat tárolására alkalmas. A barlangban történt vizsgálatok során az integrációs időköz mindig

60 perc volt. Az adatokat a műszerhez tartozó EasyWeather elnevezésű szoftver segítségével olvasta le az állomásról a PC.

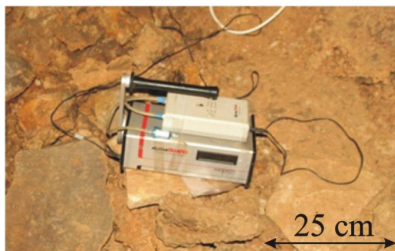


12. ábra: A Pál-völgyi-barlangban elhelyezett FWS 20 meteorológiai állomás

5.1.2. Levegő radonkoncentrációjának vizsgálata aktív radon detektorral

AlphaGuard

A barlangi levegő radonaktivitás-koncentrációjának hosszú távú monitorozásához (1,5 év) egy Genitron Instruments, ionizációs kamrás AlphaGuard PQ2000 radonmonitort alkalmaztam (13. ábra). A műszer alkalmas hosszú távú monitorozásra (levegő radonaktivitás-koncentrációjának nyomon követésére) $2 \text{ Bq/m}^3 - 2 \text{ MBq/m}^3$ mérési tartományban, és a radonaktivitás-koncentráció mellett megadja a mérés abszolút hibájának, a hőmérsékletnek, a légnyomásnak és a relatív páratartalomnak az értékét is. A műszer diffúziós üzemmódban 10 és 60 perces integrációs időközzel tud dolgozni, a mérések során 1 órás intervallummal használtam.



13. ábra: A hosszú távú radonkoncentráció monitorozáshoz használt AlphaGuard radon monitor a Pál-völgyi-barlangban

RAD 7

A barlangi levegő radonaktivitás-koncentrációjának rövid távú méréséhez (pl. párhuzamos mérés több ponton) RAD 7 radon monitort használtam. A műszer 0,7 l-es kamrájában egy beépített szilárdtest félvezető detektor (Si) található, ami az α -sugárzás energiáját elektromos jellé alakítja át, illetve a kibocsátott α -részecskék energiája alapján meghatározza, hogy melyik radon izotóp keltette a sugárzást. Ezzel a módszerrel ^{222}Rn , és ^{220}Rn izotópok leányelemei (^{216}Po , ^{218}Po és bomlástermékeik) detektálhatók. A félgömb alakú kamra belsejét elektromos vezető réteg vonja be, amit nagyfeszültségre kapcsolunk. A detektorba bejutott levegővel keveredett és ott elbomlott radonból keletkezett pozitív töltésű ^{218}Po -t a feszültség következtében kialakult elektromos tér a Si-detektorra hajtja. A detektor felületén a ^{218}Po izotópok alfa-részecskék kisugárzása közben, rövid felezési idejüknek köszönhetően (≈ 3 perc) gyorsan elbomlanak. A detektor ezeket az α -részecskéket detektálja. Több, különböző energiájú részecske detektálása egy spektrumot eredményez. A műszer a spektrum alapján kiválogatja a ^{218}Po bomlásait. A ^{218}Po pár perccel a radon után bomlik, ezért ezt „friss” radonnak hívjuk, míg a ^{214}Po bomlása csak két lassú béta-bomlás után következik be, ezért az eredeti ^{222}Rn után megközelítőleg fél órával bomlik el. Gyors radonkoncentráció változásokat ez utóbbival nem lehet követni, ezért a radonkoncentráció csak a ^{218}Po beütésszámai alapján állapítható meg (sniff üzemmód).

5.1.3. Levegő radonkoncentrációjának vizsgálata passzív detektorral

Maratottonyom-detektoroknak azokat az anyagokat nevezzük, amelyekben a töltött ionizáló részecskék (protonok, alfa-részecskék és ennél nehezebb ionok) pályájuk mentén olyan maradandó roncsolást (látens nyomot) hoznak létre, amelyek a későbbiekben kémiai maratással vizuálisan megfigyelhetővé válnak (FLEISCHER et al., 1975; DURANNI & BULL, 1985 in CSIGE, 2008).

A detektorlemez adott területén létrejött nyomok száma arányos a radon átlagos aktivitáskoncentrációjával és az expozíció idejével. A vizsgált helyiség légtérében lévő radonnak a kihelyezési időtartamra vonatkozó átlagos aktivitáskoncentrációja pedig a detektor geometriai elrendezésétől függő kalibrációs tényező ismeretében kiszámítható, amelyet általában a gyártó ad meg (MINDA, 2009).

Maratottonyom-detektorként szigetelő anyagok, elsősorban műanyagok, üvegek és bizonyos kristályok használhatók. Ezek közül a kristályok és üvegek érzékenysége kicsi, protonok és α -részecskék detektálására nem alkalmasak. A műanyagok között számos nagyérzékenységgel bíró anyag található, amelyekkel protonokat és α -részecskéket is lehet detektálni. Ezek közül is

kiemelkedik a CR-39 néven már régóta ismert polyallyldiglycol-karbonát (PADC), amelyet 1978. óta használnak maratottnyom-detektorként (CARTWRIGHT et al., 1978, in CSIGE, 2008). A nyomdetektorok használata nagyon elterjedt, mivel ez a módszer olcsó, egyszerű, a filmek a gamma- illetve bétasugárzások iránt érzéketlenek és az eredmények könnyen dokumentálhatók. A módszer hátránya, hogy lassú és nehézkes a kiértékelés, ezen felül speciális laboratóriumi módszereket igényel, valamint hónapos besugárzási idők szükségesek. A barlangokban végzett mérések során egy pontra több különböző gyártmányú detektort helyeztünk, így a Pannon Egyetem Radiokémiai és Radioökológiai Intézetével együttműködve a különböző detektortípusokat is vizsgáltuk. Az eredmények fejezetben a dolgozatban a Radosys Kft. által gyártott Raduet detektorok eredményeit mutatom be, mivel ebből a detektortípusból az összes turnusban volt kihelyezve egy-egy a mérési pontokon. A nyomdetektorok eredményeinek kiértékelésére Veszprémben, a Pannon Egyetem Radiokémiai és Radioökológiai Intézetében került sor.

5.1.4. Barlangi agyag pórusaiban lévő levegő radonkoncentrációjának vizsgálata

A barlangi agyag pórusaiban lévő levegő radonkoncentrációjának értéke arról ad információt, hogy az agyagban található ^{226}Ra -ból mennyi radon jut az üledék pórusaiba. A módszer megegyezik a talajgáz radonkoncentráció meghatározásával, csak jelen esetben nem a talajpórus, hanem a barlangi üledék pórusainak radonkoncentrációját vizsgáljuk. Ennek meghatározásához az előző fejezetben bemutatott RAD 7 radonmonitort és egy talajgáz szondát használtam (14. ábra). A szonda tulajdonképpen egy mintavevő cső, amelyet kalapács segítségével a talajba (jelen esetben agyagos üledékbe) juttatunk 30-70 cm-es mélységbe, teflon csövekkel a műszerhez kapcsolunk és segítségével megmérjük a talaj/üledék pórusaiban lévő levegő radonkoncentrációját. A mérés előtt a páratartalmat lecsökkentettük 7 %-ra, a műszert thoron üzemmódban (radon- és toronkoncentráció párhuzamos mérése) használtuk és hatszor öt perces méréseket végeztünk.



14. ábra: Agyagos kitöltés pórusaiban lévő levegő radonkoncentrációjának meghatározása a Pál-völgyi-barlangban

5.2. Laboratóriumi vizsgálatok

5.2.1. Fizikai mérések

Radon kibocsátás meghatározása

Laboratóriumban a talaj/üledék minta fajlagos radon kibocsátását mBq/kgs-ban adjuk meg, ami azt jelenti, hogy a minta 1 kg-nyi tömegéből másodpercenként mekkora aktivitás lép ki. A mérés előtt a mintát radonkamrába kell helyezni, ami egy zárható csapokkal ellátott alumínium henger, majd három hét várakozást követően a mintában keletkező és elbomló radonatomok száma között egyensúly áll be (KRISHNASWAMI AND COCHRAN, 2008). Ezután a kamra kinyitott csapjait műanyag csövek segítségével egy páralekötőn keresztül a RAD 7 radondetektorhoz kapcsoljuk, és meghatározzuk a minta feletti levegő radonkoncentrációját. A kibocsátás a következő módon számolható ki (ludens.elte.hu/~akos/sflab):

$$C_{lev} = C_m + C_m - C_h \cdot \frac{V_{det}}{V_{net}} \quad 1. \text{ egyenlet}$$

ahol:

C_{lev} = a radonkoncentráció értéke a bezárt kamrában a detektor hozzákapcsolása előtt (Bq/m³)

C_m = a minta feletti levegő radonkoncentrációja a kamrában a mérés során (Bq/m³)

C_h = a mérés előtt mért háttérkoncentráció értéke abban a helyiségben (és így a detektor térfogatában is), ahol a mérés történik (Bq/m³)

V_{det} = a detektor, a páralekötő és a használt csövek térfogata (m³)

V_{net} = a kamra térfogata – a minta térfogata (m³)

Ezek alapján az abszolút kibocsátás az alábbi képlet segítségével számítható ki:

2. egyenlet

^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K fajlagos aktivitásának meghatározása

Barlangi agyagok és kőzetek fajlagos ^{226}Ra , ^{232}Th és ^{40}K aktivitásának meghatározására laboratóriumi körülmények között került sor gamma-spektroszkópiával.

A gamma-spektroszkópiai méréseket egy GC1520-7500SL típusú HPGe detektoron végeztem az ELTE TTK Atomfizikai Tanszékén. A detektor egy nagy tisztaságú germánium félvezető detektor, ami 100 keV – 2800 keV közötti gamma-fotonok detektálására van beállítva. Egy foton detektálása során mindig a detektor érzékeny térfogatában maradt energiát mérjük. A leadott energiát a mérendő részecskének a detektor anyagával való kölcsönhatása határozza meg. Ez lehet fotoeffektus, egyszeres vagy többszörös Compton-szórás, illetve párkeltés. A meglökött elektronok mozgási energiája sokszorosa a detektor atomjaiban lévő elektronok kötési energiájának, így egy meglökött elektron a leadott energiájával arányosan $10^2 - 10^7$ töltéshordozó párt hoz létre egy félvezető detektorban. A keletkezett töltésmennyiséget határozzuk meg a töltések bizonyos idő alatt történő begyűjtésével. Az energiaspektrumban a karakterisztikus energiáknál éles (kb.100 eV széles), Gauss-görbe alakú csúcsokat detektálhatunk. E csúcsok alatti terület a bomló elem aktivitásával függ össze, arányos továbbá azzal, hogy egy adott energiájú vonal milyen valószínűséggel jelenik meg az anyaelem bomlása esetén.

A detektort egy ólom-vas burkolat veszi körül. Az ólomréteg elnyeli a környezetből érkező γ -fotonokat, viszont a gamma-sugárzás gerjeszti az ólmot. Ezért használunk vasat is, ami csökkenti az ólom röntgenvonalainak megjelenési valószínűségét a spektrumban, ezzel csökkentve a háttérrel.

A minták fajlagos ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K aktivitásának meghatározásához 12-24 órás méréseket végeztem a minta aktivitásától függően, és a fajlagos aktivitást (Bq/kg) az alábbi képlet segítségével határoztam meg (Kiss, 2005):

$$A = \frac{T}{\eta \cdot I \cdot t} \quad 3. \text{ egyenlet}$$

ahol:

A = a minta aktivitása

T = a mért csúcs területe

η = a csúcshatásfok

I = a gamma-foton relatív gyakorisága

t = a mérési idő

A kapott gamma-spektrumok kiértékeléséhez Camcpr és Spill3 nevű csúcskereső és csúcsillesztő programokat, Monte Carlo szimulációs hatások számító programot (mindhárom

Deák Ferenc fejlesztése, ELTE TTK Atomfizikai Tanszék) és NuDat2.5 intenzitásokat is tartalmazó internetes adatbázist használtam.

A ^{232}Th fajlagos aktivitását a 911 keV energiánál lévő ^{228}Ac csúcsából, a ^{40}K aktivitását közvetlenül az 1461 keV-nál lévő csúcs nagyságából határoztam meg. A ^{226}Ra aktivitáskoncentráció becsüléséhez annak 186 keV-es saját csúcsát értékeltem ki. Feltételeztem, hogy a barlangi agyag- és kőzetmintákban az ^{238}U és ^{226}Ra radioaktív egyensúlyban vannak. Mivel az ^{235}U közel ugyanakkora energiájú gamma-fotonokat bocsát ki, mint a ^{226}Ra , ezért EBAId et al. (2005) által publikált arányt alkalmaztam a számításokhoz, miszerint a 186 keV-es csúcs beütésszámának 58,3%-a származik a ^{226}Ra -tól és 41,7%-a az ^{235}U -tól, ha radioaktív egyensúlyt tételezünk fel az ^{238}U és a ^{226}Ra között.

Vízminták radontartalmának meghatározása

Vízminták radontartalmának meghatározását Tri-Carb 1000 folyadéscintillációs spektrométerrel végeztem. A mérés alapja, hogy a szcintillátorként használt anyag molekulái radioaktív sugárzás hatására gerjesztett szintre jutnak, majd amikor visszatérnek alapállapotba, a felesleges energiát foton formájában fényfelvillanás közben sugározzák ki. A berendezésben két fotoelektronokszorozó található egymással szemben, amelyek a fényfelvillanásokat detektálják. A két műszer koincidenciába van kapcsolva, ezzel csökkenthető a kozmikus háttérsugárzás okozta háttér. A jeleket egy analóg-digitál konverter (ADC) alakítja át digitális jellé, majd egy sokcsatornás analízátorra küldi. A gépet bekapcsolása után egy ismert radioaktív izotóppal (^{14}C) kalibráljuk.

5.2.2. Kőzettani vizsgálatok

Mintaelőkészítés

A geokémiai vizsgálatokat megelőzően egyes módszerekhez szükség volt a minták megfelelő előkészítésére, amelyek a következők:

Nedves szitálás

A Pál-völgyi-barlangból és a Molnár János-barlangból származó barlangi agyagból vett mintákat nedves szitálással bontottuk hat különböző szemcsemérettartományra (<0,063 mm, 0,063-0,125 mm, 0,125-0,250 mm, 0,25-0,50 mm, 0,5-1,0 mm, >1,0 mm). A szitáláshoz a nagy agyagtartalom miatt nagyon sok vizet kellett használni, hogy az összetapadt szemcsék szétváljanak, így nagy anyagvesztéssel dolgoztunk. Ennek következtében a szitálás eredményéből nem számoltuk ki a különböző szemcseméret frakciók jelenlétének százalékos arányát. A nedves szitálást így csak a 0,125-0,250 mm-es frakció elkülönítésére használtuk, amiből később szemcséket szeparáltunk, hogy vékonycsiszolatokat készítsünk belőlük.

A kiválasztott mintákat először dezaggregálószer felhasználása nélkül desztillált vízben áztattam, majd néhány napig állni hagytam. Miután eléggé fellazultak, a talajokra, üledékekre és laza kőzetekre használt szitasoron rázógép segítségével hat frakcióra bontottam ($<0,063$ mm, 0,063-0,125 mm, 0,125-0,250 mm, 0,25-0,50 mm, 0,5-1,0 mm, $>1,0$ mm). Szitálás után az egyes frakciókat szobahőmérsékleten szárítottam. A legkisebb ($<0,063$ mm) frakciót ülepítttem. A vizsgálat az ELTE TTK Kőzettani és Geokémiai Tanszékén működő Litoszféra Fluidum Kutató Laborban készült.

Csiszolatkészítés

A pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálatokhoz vékonycsiszolatokat készítettem a Pál-völgyi-barlangból a barlangi agyag felszínéről vett mintákból (PB2A, PB3A, PB), a mészkő és márga savazás után maradt oldási maradékából és a Molnár János-barlang víz alatti agyagából vett mintából. Az előzetesen nedves szitálással elkülönített, 0,125-0,250 mm szemcseméret tartományú frakciókból optikai mikroszkóp alatt szemcséket szeparáltam. A szeparáláskor elsősorban a sötét, illetve színes szemcséket válogattam ki (az egyértelműen kvarc és karbonát szemcséket nem). A kiválasztott szemcséket csiszolt műgyantára tettem és pillanatragasztóba ágyaztam. A felületet lecsiszoltam, a kisebb egyenetlenségeket polírozással tüntettem el.

A vizsgálatához az előzetesen előkészített lemezeket vákuumgőzölő segítségével 20 nm vastagságú szénréteggel vontuk be, hogy megfelelő vezetőréteg alakuljon ki rajtuk. A mérés során először kalibrációt végeztünk, majd elemeztük a kiválasztott szemcséket. A vizsgálatra az ELTE TTK Kőzettani és Geokémiai Tanszékén került sor.

Porítás

A röntgen pordiffrakció vizsgálat elvégzéséhez porított mintára van szükség. Az analízishez átlagmintát használtunk. A Pál-völgyi-barlangból az agyagos kitöltés felszínéről vett mintákat (PB2A, PB3A, PB5A, PB6A) szobahőmérsékleten szárítottuk, majd korund mozsárban porítottuk.

Orientált preparátum készítése

A röntgen pordiffrakció analízist az agyagásványok könnyebb azonosíthatóság érdekében orientált preparátumokon is elvégeztük. Ehhez is a Pál-völgyi-barlangból gyűjtött agyagos kitöltés felszínéről származó mintákat használtuk (a 2., 3., 5. és 6. mérési/mintavételezési pontokról származó minták esetében végeztük el a vizsgálatot). A preparátumokat a 2 mikron alatti szemcseméret frakcióból készítettük el. Az előzetesen nedves szitálással leválasztott 63 mikron alatti frakciót mérőhengerbe helyeztük és desztillált vízzel öntöttük fel, majd a Stokes-törvény alapján megadott ideig ülepedni hagytuk (az Atterber program segítségével számoltuk

ki, hogy adott ülepedési időhöz mekkora vízoszlop tartozik, amelyet a mintáról le kell szívni 2, 70 g/cm³-es átlagsűrűséget feltételezve).

10 h - 13,3 cm

11 h - 14,6 cm

12 h - 15,9 cm

13 h - 17,3 cm

14 h - 18,6 cm

15 h - 19,9 cm

16 h - 21,2 cm

17 h - 22,6 cm

18 h - 23,9 cm

A leszívott anyagmennyiséget (a 2 mikronos frakciót) teljesen beszárítottuk (kemencében, maximum 80 °C-on). Mivel mennyiségi analízist (tekintettel arra, hogy az agyagok esetében nagy hibával terhelt) nem, csak minőségi elemzést végeztünk, minimum 45 mg mintamennyiségre volt szükségünk a preparátumok elkészítéséhez. Az orientált preparátumokat (glikolozás, hevítés) Farkas Izabella készítette el a MOL Magyar Olaj- és gázipari Nyrt. Batthyányi úti telephelyén.

Agyagminták karbonáttartalmának kioldása savazással

A kőzettani vizsgálatok során a Pál-völgyi-barlangban előforduló két fajta kőzet (Szépvölgyi Mészkö és Budai Márga) oldási maradékát is vizsgáltuk. Ehhez a kőzeteket először kalapáccsal, majd achát mozsárban törtük, amíg maximum dió nagyságú darabokat kaptunk. Ezeket mérőhengerbe helyeztük és elszívó fülke alatt 10 %-os HCl oldattal kezeltük. Ha a pezsgés elmúlt és ismételt kevergetés, rázás hatására sem indult újra, a sósavat a mintákról leöntöttük. Ezt többször megismételtük. A mintákat egy hónapon át, a pezsgés észlelésének megszűnéséig savaztuk, azaz addig, amíg volt karbonáttartalom a mintákban. Ezután a HCl-ot a mintákból kimostuk és a megmaradt oldási maradékot a már ismertetett módon leszírtuk. Az így elkülönített, hat szemcseméret tartomány közül a 0,125-0,250 mm-es frakcióból szemcséket szeparáltunk, amelyekből vékonycsiszolatot készítettünk. A vizsgálatot az ELTE TTK Kőzettani és Geokémiai Tanszékén működő Litoszféra Fluidum Kutató Laborban végeztük el.

Szemcseméret-eloszlás vizsgálata

A szemcseméret eloszlás befolyásolja a minták radon kibocsátási képességét, ezért fontos tényező. A Pál-völgyi-barlangból a barlangi agyag felszínéről és a fúrásból vett minták 63

mikron alatti frakciójának szemcseméret eloszlását vizsgáltam (az ennél nagyobb frakciók a minták egy részében egyáltalán nem, a többi minta esetében csak nagyon kis mennyiségben fordultak elő).

A mintaelőkészítési folyamat során nedves szitálással elkülönített, 63 mikrométernél kisebb szemcseméretű frakció eloszlását egy Fritsch Particle Size Analysette 22 típusú lézeres szemcseméret eloszlás elemzővel határoztam meg az ELTE TTK, Közettani és Geokémiai Tanszékén. A szemcseméret mérési tartomány alsó határa 0,10 μm . A berendezés egy diszpergáló részből és egy átfolyós küvettára merőleges lézeres mérőből áll. A két részt két vékony gumicső köti össze. A szemcsék összetapadását emulgeálószer hozzáadásával akadályoztuk meg.

Vékonycsiszolatok vizsgálata pásztázó elektronmikroszkóppal

A minták pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálatával a bennük található ásványokat azonosítottam. A vizsgálat során a szemcsék felületét vizsgáltam. Az elektronsugár behatolási mélysége függ a sugárzás energiájától, az anyag fizikai és kémiai tulajdonságaitól és a sugárzás, illetve az anyag kölcsönhatása határozza meg. A vizsgálat során a kölcsönhatás következtében keletkező jeleket (szekunder elektronok, röntgensugárzás, stb.) detektáljuk. A keletkezett jelek különböző típusú információval szolgálnak a vizsgált mintáról. A szekunder elektronok a felület topográfiájáról, a visszaszórt elektronok a minta összetételéről adnak felvilágosítást. A karakterisztikus röntgensugárzás segítségével elemanalízis végezhető. A primer ionizáció során a belső elektronhéjról kilökött elektron helyét egy külső héjon lévő elektron tölti be. Az így felszabaduló energiát az atom karakterisztikus röntgensugárzás formájában adja le. Ennek a sugárzásnak a hullámhosszát (vagy energiáját) a két elektronhéj közötti energiakülönbség határozza meg, ami karakterisztikus a kibocsátó elemre, azaz a kémiai elemazonosítás és koncentrációmérés a röntgenfoton energiájának (EDS) mérésén alapszik.

A vizsgálatok az ELTE Közettani és Geokémiai Tanszékének *EDAX PV 9800* energia diszperzív röntgen-spektrométerrel felszerelt *AMRAY 1830 I/T6* típusú pásztázó elektronmikroszkópjával készültek. Az elemzések során 20 kV-os gyorsító feszültséget alkalmaztunk, a primer elektronáram pedig 1-2 nA közötti volt. Az energia diszperzív spektrumok mennyiségi kiértékelései a műszer standardmentes programjával készültek, ami magában foglalja a mátrixhatást kiküszöbölő ZAF-korrekciót (a ZAF korrekció a mátrixhatást veszi figyelembe egy elemre, ami a mintában található többi elem koncentrációjától függ) is (GOLDSTEIN, 1992).

Ásványi összetétel vizsgálata röntgen pordiffrakcióval

Az üledékek legfőbb jellemzői a szemcseméret és az összetétel. Kristályszerkezet vizsgálatára és finomszemcsés üledékek, elsősorban agyagok ásványos összetételének meghatározására az egyik legelterjedtebb módszer a röntgen pordiffrakció. A röntgensugárzás elhajlásával (diffrakciójával) kapott intenzitásmaximumok térbeli helyzetéből és relatív erősségéből meghatározhatjuk ismeretlen anyagok kristályszerkezetét. Előnyei a gyors és könnyű használat, a roncsolásmentes technika, és hogy kis mintamennyiség is elegendő a méréshez. Mivel a kristályrácsban a periodicitás összemérhető a módszerben használt monokromatikus röntgensugárzás hullámhosszával, ezért a hullámok interferálnak. A fáziserősítések irányából lehet következtetni a kristályrács szerkezetére. A mintában található ásványok kristályrácsára jellemző távolságokat megjelenítő diffraktogramok kiértékelése számítógéppel történik, a különböző d , vagyis rácssíktávolság értékeknél megjelenő intenzitáscsúcsok adatbázisok segítségével visszakereshetők, így az ásványoknak megfeleltethetők. Minél többféle ásvány van a mintában, annál nehezebb a visszakeresés az átfedő csúcsok miatt. Hibát okozhat többek közt a nem megfelelő porítás, illetve egy-egy ásványszemcse orientálódásából származó többletintenzitás (SUBSITS, 2009).

Pordiffrakcióról akkor beszélünk, amikor a besugárzott térfogatban nagy számú, véletlenszerűen orientált kristályszemcse helyezkedik el. Ekkor a diffrakciós mérés eredményeként kapott diffraktogram intenzitáseloszlása nem változik a minta forgatásakor. A gyakorlatban egy pordiffrakciós mérésben megmérjük a minta körül a szórt sugárzás intenzitáseloszlását a 2θ függvényében. Kristályos szerkezetű anyagról készült röntgen pordiffraktogramon a vonalak helyét és az egymáshoz képest mutatkozó relatív intenzitásukat a vizsgált anyag kristályszerkezete, valamint az elemi cellában helyet foglaló atomok típusa határozza meg. Következésképpen, a röntgen pordiffraktogram a különböző kristályos fázisokra más és más, azaz ujjlenyomatszerűen alkalmas a kristályos anyag azonosítására.

A röntgen pordiffrakció analízis során porított átlagmintákat és orientált peraparátumokat is vizsgáltunk. A porított átlagmintákat az ELTE TTK Ásványtani Tanszékén vizsgáltuk, a használt műszer típusa Siemens (Bruker) D5000 diffraktométer, amelyet Cu K α gerjesztő sugárzással és másodlagos grafit monokromátor használatával működtettünk. A minták diffraktogramján megjelenő csúcsok azonosítását az EVA nevű szofverrel végeztem el.

A röntgen pordiffrakció analízist orientált mintákon is elvégeztük az agyagásványok minőségi elemzéséhez és az agyagásvány diagnosztikához. Az orientált preparátumok vizsgálatát Farkas Izabella végezte el a MOL Magyar Olaj- és gázipari Nyrt. Kutatási Laboratóriumában található Bruker D8 Advance, 2θ - θ , párhuzamos geometriájú, LynxEye® egydimenziós

detektorral felszerelt röntgen-pordiffraktométeren. A méréshez Cu-K α sugárzást alkalmaztunk a következő mérési paraméterekkel: 40 kV gyorsítófeszültség és 40 mA áramerősség mellett a lépésköz 0,01° 2 θ , a számlálási idő 17,7 s volt. A felvételek 2°–35° 2 θ tartományban készültek. A fázisazonosításokhoz a Diffracplus EVA 15.0. szoftver Search-Match keresőjét használtuk, ami a mért diffraktogramot összeveti az ICDD (International Centre for Diffraction Data) PDF-2 adatbázisában lévő diffraktogramokkal és annak alapján azonosíthatóak a jelenlévő ásványfázisok. Az azonosítás a csúcspozíció (d -érték), csúcsintenzitás és csúcprofil alapján történt.

5.3. Alapstatisztikai értékelés

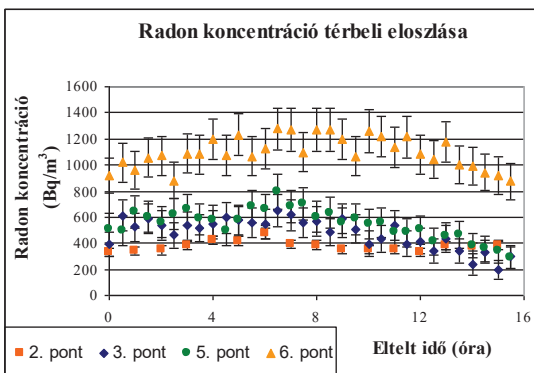
A hosszú távú radonkoncentráció monitorozásból származó adatokat STATGRAPHICS Centurion XV szoftver segítségével elemeztem. Ez a statisztikai program könnyen és gyorsan tette lehetővé az alapstatisztikák kiszámítását, különös tekintettel a robusztus (vagy rezisztens) statisztikákra, figyelembe véve a mért radonkoncentrációkban jelentkező kiugró értékeket. A mért paraméterek eloszlását felderítő adatelemzési módszerekkel (exploratory data analysis; EDA) vizsgáltam és elkészítettem a hagyományos gyakorisági hisztogramot, a scatter plot-ot, a box-and-whiskers plot-ot, illetve a kumulatív gyakorisági görbét (21. ábra). A kiugró értékektől mentes eloszlásokra kiszámítottam az eloszlások centrális értékét jellemző mediánt, valamint a szórásra jellemző adat terjedelmet a minimum és maximum értékekkel (illetve ezek közötti távolsággal; range) és a kvartiliseket (illetve ezek közötti távolsággal; inter-quartile range), Tukey robusztus five-letter display módszerét követve.

6. PÁL-VÖLGYI-BARLANG VIZSGÁLATI EREDMÉNYEI

6.1. Radonkoncentráció térbeli eloszlásának vizsgálata

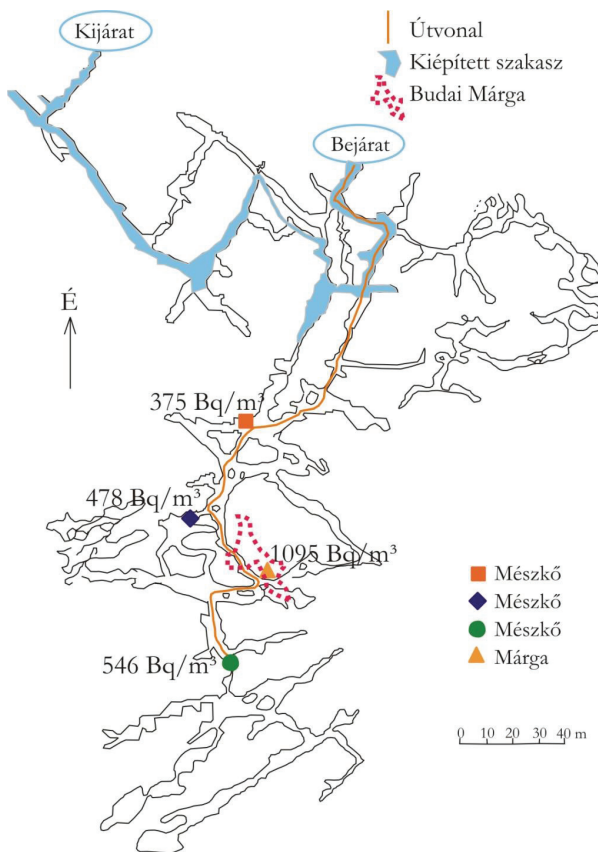
6.1.1. Radonkoncentráció térbeli eloszlásának vizsgálata aktív radon detektorral

A radonkoncentráció értéke a barlangon belül az egyes termekben, járatokban különbözőképpen alakulhat. Egy rövid idejű (16 órás) méréssel célok ennek a különbségnek a vizsgálata volt. A másfél évre kihelyezett radon monitor mellett három másik aktív radon detektort (RAD 7) helyeztem el a barlang további három pontján (3., 5., 6. mérési pont). A három RAD 7 fél órás, az AlphaGuard 1 órás integrációs időközzel mérte a radonkoncentráció változását.



15. ábra: Radonkoncentráció változása a 2., 3., 5., 6. mérési ponton 2010. február 26-án. A 2. mérési ponton AlphaGuard radonmonitort, a másik három ponton RAD 7 radon detektort használtunk.

A 15. ábra mutatja, hogy a radonkoncentráció értéke a 2., 3. és 5. mérési pontokon 500 Bq/m^3 körüli, míg ugyanebben az időben a 6. mérési ponton 1100 Bq/m^3 körüli értéket mutatott. Az első három mérési pont a barlang azon részén helyezkedik el, ahol a Szépvölgyi Mészke a barlang falköze, míg a 6. mérési pont egy felső járatban található, amely már felnyúlik a Budai Márgába (16. ábra). A négy görbe időbeli lefutása azonban hasonló. Ezek alapján feltételezhető, hogy a barlangi légmozgás a négy vizsgált helyszínen ugyanúgy hat, ugyanolyan irányú. Hasonló következtetésre jutott KÖVÉR (2007) is a Pál-völgyi-barlangban végzett mérései során.



16. ábra: Radonkoncentráció térbeli eloszlásának vizsgálata aktív radon detektorokkal (2010.02.26).

Az egyes pontokon látható számok a 16 órás radonkoncentráció mérés (2. pont: AlphaGuard, 3., 5., 6. pont: RAD 7) átlagát jelölik.

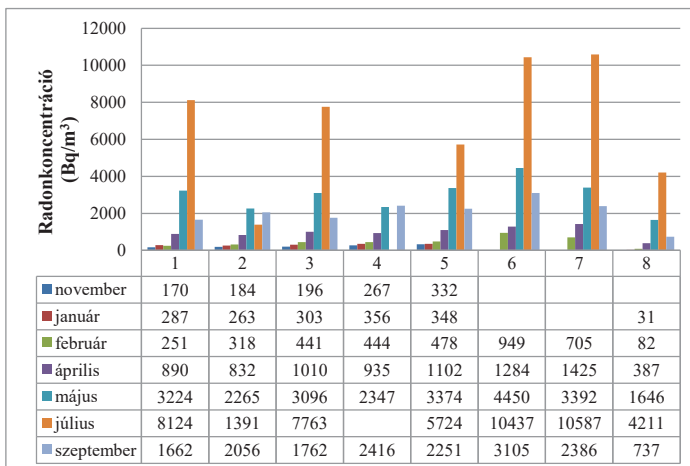
6.1.2. Radonkoncentráció térbeli eloszlásának vizsgálata passzív radon detektorral

A barlangi levegő radonkoncentrációja a barlangon belül nem mutat homogén eloszlást, amit a rövid távú mérések eredményei világosan bizonyítanak (16. ábra). A különbségek pontosabb megismerése érdekében azonban a barlangban kijelölt 8 mérési/mintavételezési ponton (8. ábra) átlagosan kéthavonta nyomdetektorokat helyeztünk el. Ez a módszer a radonkoncentráció gyors időbeli változásainak nyomonkövetésére nem alkalmas, de a mérés időszakára jellemző átlagos értékek meghatározására igen.

1. periódus	2010.11.23-2011.01.12.	1., 2., 3., 4. és 5. mérési pont
2. periódus	2011.01.12-2011.02.22.	1., 2., 3., 4., 5. és 8. mérési pont
3. periódus	2011.02.22-2011.03.22.	1., 2., 3., 4., 5., 6., 7., és 8. mérési pont
4. periódus	2011.04.08-2011.05.24.	1., 2., 3., 4., 5., 6., 7., és 8. mérési pont
5. periódus	2011. 05.24-2011.07.21	1., 2., 3., 4., 5., 6., 7., és 8. mérési pont
6. periódus	2011.07.21-2011.09.23	1., 2., 3., 5., 6., 7., és 8. mérési pont
7. periódus	2011.09.23-2011.11.15	1., 2., 3., 4., 5., 6., 7., és 8. mérési pont

3. táblázat: A Pál-völgyi-barlangban elhelyezett Raduet nyomdetektorok expozíciós ideje

2010. november 23. és 2011. november 15. között hétszer került sor a nyomdetektorok cseréjére (3. táblázat). Az alkalmazott Raduet (Radosys Kft. által gyártott) detektor radon- és toronkoncentráció párhuzamos mérésére is alkalmas. Van azonban külön-külön minden egyes detektorra egy úgynevezett kimutathatósági határérték (LLD-Lower level of detection, a legkisebb, még megbízhatóan meghatározható radonszint). Ennek értéke számos tényezőtől függ, pl. adott mérési ponton a toronkoncentráció kimutathatósági határértéke függ az azon a ponton mért radonkoncentráció értékétől is. A Pál-völgyi-barlangban végzett nyomdetektoros mérések során a radonkoncentráció értéke a kimutathatósági határértéket egy eset kivételével meghaladta, a toronkoncentráció azonban az esetek többségében a kimutathatósági határérték alatt (jelen esetben $\sim 700 \text{ Bq/m}^3$) volt, ezért ezeket az adatokat nem használtam fel.



17. ábra: Radonkoncentráció térbeli eloszlása a Pál-völgyi-barlangban (Raduet passzív detektorok)

A hónap neve azt a hónapot jelöli amikor elkezdődött a mérés, a vízszintes tengelyen az egyes mintavételezési pontokat jelöltem.

A barlangi levegő radonkoncentrációjának egy éven át tartó vizsgálati adatai (17. ábra) azt mutatják, hogy a barlangon belül az egyes pontokon (termekben) a radonkoncentráció értéke eltérő, illetve egy évszakos periodicitás is megfigyelhető.

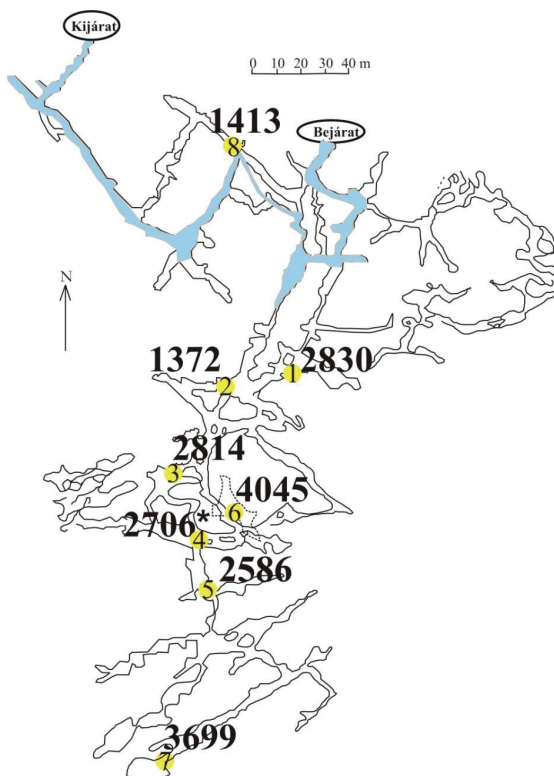
Az egyes mérési pontok közül a júliusi eredményeket kivéve a legkisebb radonkoncentráció értékek mindig a 8. mérési pontban voltak, ami egy természetes szellőzőnyílás mellett található (8. ábra). Figyelemre méltó azonban, hogy ennek ellenére itt is kBq/m^3 nagyságrendű radonkoncentráció alakulhat ki. A legnagyobb radonkoncentráció értékeket a barlang bejáratától legtávolabb található, 7. mérési ponton és a Budai Márgába nyúló 6. mérési ponton detektáltuk. A bejáratától való távolság növekedésével a radonkoncentráció értékének növekedése egyértelműen nem figyelhető meg minden mérési periódusban.

A passzív nyomdetektoros mérések eredményei alapján a barlangi levegő radonkoncentrációjának évi átlagértékére csak az 1., 2., 3. és 5. mérési pont esetében adhatunk becslést (4. táblázat), ezen a négy mérési ponton 2010. november 23. és 2011. november 15. között kb. 3 hét kivételével folyamatosan voltak elhelyezve detektorok. A nyomdetektoros mérések eredményei alapján a vizsgált pontokon az évi átlagos radonkoncentráció értéke $1044\text{--}2087 \text{ Bq/m}^3$ között változik. Ez egy nagyságrendbe esik a jelen barlangban korábban végzett mérések során tapasztalt eredményekkel (KÁVÁSI, 2006; BEZSENYI, 2006; KÖVÉR, 2007).

Mérési helyszín	Évi átlagos radonkoncentráció (Bq/m^3)
1. mérési pont	2087 ± 76
2. mérési pont	1044 ± 79
3. mérési pont	2082 ± 86
5. mérési pont	1944 ± 91

4. táblázat: Raduet típusú passzív nyomdetektorokkal meghatározott évi átlagos radonkoncentráció a Pál-völgyi-barlang egyes mérési pontjain

A 2011. február 22. és 2011. november 15. közötti időszakban azonban mind a nyolc ponton történt nyomdetektoros (Raduet) mérés, ezért az erre az időszakra jellemző átlagos radonkoncentráció értékek egymással összevethetők (18. ábra). A 4. mérési pontra jellemző radonkoncentráció érték meghatározásához egy becslést alkalmaztunk, mert ezen a ponton 2011.07.21-2011.09.23 között nem volt kihelyezve detektor. A 4. pontra a többi mérési ponton mért május/júliusi és július/szeptemberi radonkoncentráció arányok alapján becsültük meg a radonkoncentráció átlagértékét a 2011. 07. 21-2011. 09. 23 közti időszakra.



18. ábra: A radonkoncentráció térbeli eloszlását jól bemutató átlagértékek (a 2011. február 22. és 2011. november 15. közötti időszakban) a Pál-völgyi-barlang 8 mérési pontján.

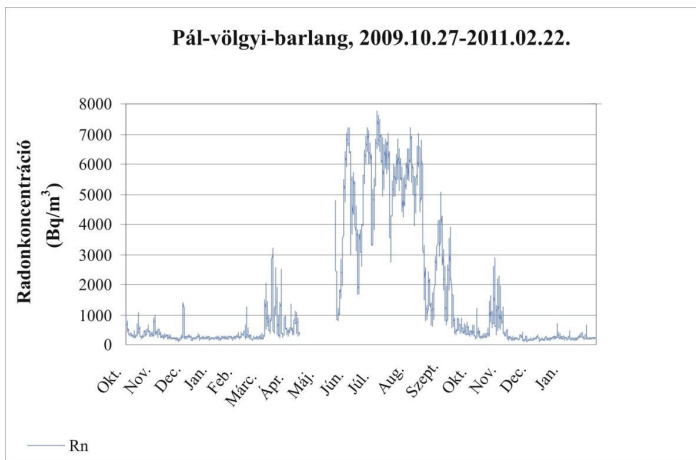
A sárga körben jelzett számok a mérési pont számát, a fekete számok a radonkoncentráció átlagos értékét jelölik az említett időszakra vonatkozóan.

A barlangi levegő radonkoncentrációja a vizsgált időszakban a 6. mérési ponton, a barlang Budai Márgába nyúló szakaszában érte el a legnagyobb értékeket (4045 Bq/m^3). A radonkoncentráció értéke a 2. mérési ponton volt a legkisebb (1372 Bq/m^3), - ahol a hosszú távú radonkoncentráció monitorozás történt -, aminél csak kicsit (3 %-kal) nagyobb a radonkoncentráció értéke a barlang természetes szellőzőnyílása mellett található 8. mérési ponton (1413 Bq/m^3) (18. ábra). A vizsgált mérési pontok közül a barlang mészkőben húzódó szakaszai közül a legmélyebben található 7. mérési ponton, a bejáratától legtávolabb található helyen volt a legnagyobb a radonkoncentráció értéke (3699 Bq/m^3).

6.2. Hosszú távú radonkoncentráció monitorozás eredményei

A hosszú távú radonkoncentráció monitorozás fő célja a Pál-völgyi-barlangban a radonkoncentráció időfüggésének vizsgálata, a barlangi levegő radonkoncentrációjában megfigyelhető hosszú és rövid távú változások leírása volt.

A közel másfél éves (2009. 10. 27-2011. 02. 22.) folyamatos monitorozás során a radonkoncentráció értéke $94\text{--}7776\text{ Bq/m}^3$ között változott. A folyamatos mérés alakulása a 19. ábra kék görbéjén látható, a radonkoncentráció évi (2009. 10. 27-2010. 10. 27.) átlagos értéke 1884 Bq/m^3 , a teljes másfél éves periódusra jellemző átlagérték 1475 Bq/m^3 .



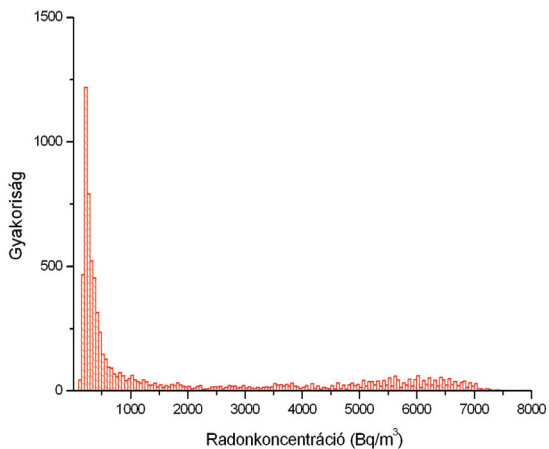
19. ábra: A radonkoncentráció (AlphaGuard) értékének változása a hosszú távú mérés során

6.2.1. Statisztikai leírás

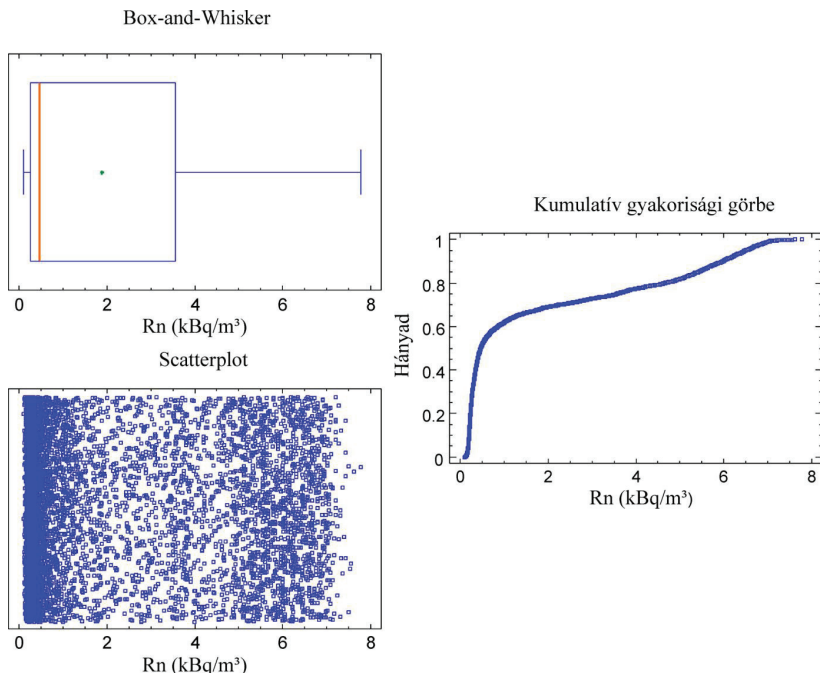
A hosszú távú radonkoncentráció monitorozás eredményeiből a statisztikai értékeléshez egy év adatait használtam (a májusi adatok technikai okok miatt bekövetkező hiánya miatt az idősor nem teljes). A Pál-völgyi-barlang kiépítetlen szakaszán, az általunk 2-es mérési ponttal jelölt helyszínen (8. ábra) a radonkoncentráció értéke $104\text{--}7776\text{ Bq/m}^3$ között változott. A mért radonkoncentrációkra jellemző kiugró értékek hatását mutatja, hogy a számított átlag értéke a vizsgált évben 1884 Bq/m^3 volt, míg a medián 474 Bq/m^3 . A gyakorisági eloszlás legvalószínűbb értéke, azaz a módusz 258 Bq/m^3 . A minta legnagyobb és legkisebb elemének különbsége 7672. Az adatok aszimmetrikus eloszlású sokaságból származnak, erre utal a ferdeség és a „box” és whiskers” ábra (21. ábra). A leíró statisztikák eredményeit a 5. táblázat és a 21. ábra foglalja össze.

	Radon
Adat szám	7882
Átlag	1884
Medián	474
Módusz	258
Mértani közép	824
Tapasztalati szórás	2278
Variációs együttható	121%
Minimum	104
Maximum	7776
Terjedelem	7672
Alsó kvartilis	262
Felső kvartilis	3552
Interkvartilis terjedelem	3290
Ferdeség	1
Csúcsosság	-0.4

5. táblázat: A Pál-völgyi-barlangban 2009.10.27-2010.10.27 között végzett radonkoncentráció monitorozás adatainak eloszlását leíró statisztikák



20. ábra: A radonkoncentráció egy éves (2009. 10.27-2010.10.27) adatsorának gyakoriság hisztogramja



21. ábra: A radonkoncentráció egy éves (2009. 10.27-2010.10.27) adatsorának box és whiskers ábrája (a vonal a mediánt jelöli (474 Bq/m^3), a pont az átlagot), Scatterplot ábrája és kumulatív gyakorisági görbéje.

6.2.2. Radonkoncentrációval párhuzamosan mért meteorológiai paraméterek eredményei

Mérési időtartamok, technikai nehézségek

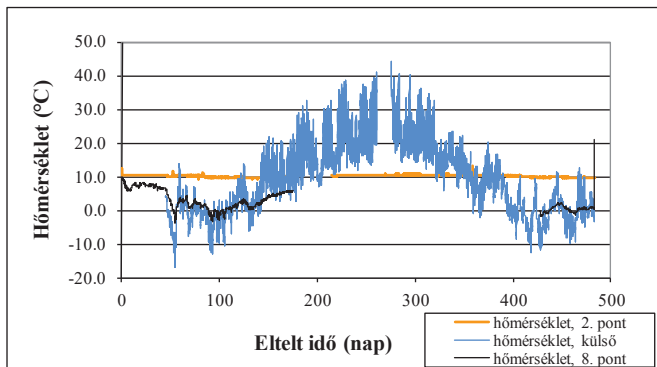
A hosszú távú radonkoncentráció monitorozás mellett a meteorológiai paraméterek folyamatos mérésére is sor került. A hőmérséklet, légnyomás és páratartalom értékeit egy órás integrációs időközzel rögzítette maga az AlphaGuard radonmonitor a 2. mérési ponton (8. ábra), és egy-egy meteorológiai állomás a barlang 8. mérési pontján és a barlangon kívül (8. ábra). A barlangon belül elhelyezett meteorológiai állomás 2009. 10. 27-2010. 04. 21. között működött hat hónapon keresztül, illetve 2010. 12. 28-tól 2011. 02. 22-ig két hónapon keresztül, a külső meteorológiai adatokat rögzítő állomás pedig 2009. 12. 11-től 2011. 02. 22-ig 14 hónapon keresztül, a radonkoncentráció monitorozás végéig, kivéve a 2010. 07. 15-2010. 07. 30 közötti időszakban (technikai okok miatt) bekövetkező két hetes szünetet.

A radonmonitorról az adatokat technikai nehézségek miatt csak a laboratóriumban tudtuk letölteni, ilyenkor a barlangban egy cserekészüléket helyeztünk el. A műszer a laboratóriumi

hőmérséklet-, légnyomás- és páratartalom értékekről csak egy bizonyos idő eltelte után (1-2 óra) tudott átállni a barlang mikroklímáját jellemző értékekre (nagyobb relatív páratartalom, télen kisebb, nyáron nagyobb hőmérséklet). Ezt az ábrák értelmezésénél figyelembe kell vennünk, a számított minimum, maximum és átlag értékeket azonban a műszercsere nem befolyásolja, az emiatt torzult összesen kb. 9 db. hőmérséklet és páratartalom érték elenyésző az összes, több mint 10 000 adathoz képest.

Hőmérséklet adatok vizsgálata

A nagyobb üregrendszerek (pl. barlangok) hőmérséklete általában a környező terület éves átlaghőmérsékletével egyezik meg. Ezt a 2. mérési ponton történt hőmérséklet mérés eredménye is igazolja. A hőmérséklet értéke viszonylag stabil volt, 9,2-13,3 °C között változott és az egy évre vonatkozó átlagérték (2009. 12. 11-2010. 12. 11. között) 10,3 °C volt. A külső hőmérséklet egy évre vonatkozó átlagértéke ugyanebben az időszakban ettől mindössze 0,3 °C-kal tért el, értéke 10,6 °C-ot mutatott a méréseink alapján. A barlang 8. mérési pontján, ami egy természetes szellőzőnyílás (egy keskeny hasadék közvetlen összeköttetést biztosít a külvilággal) mellett található, a hőmérséklet értéke már jóval szélesebb határok között változott. Ha összehasonlítjuk az itt mért értékeket a külső hőmérséklet eredményeivel, jól látható, hogy a barlang jól szellőző pontján mért hőmérséklet a külső hőmérséklet simított verziója (22. ábra). Nagyobb felbontásban itt is megfigyelhetők napszakos változások, azonban sokkal kisebb frekvenciával.



22. ábra: A különböző helyszíneken (barlangon kívül, barlangon belül a 2. és 8. mérési ponton) mért hőmérséklet értékek változása a hosszú távú (2009.10.27-2011.02.22.) mérés során

2009.12.11- 2010.12.11.	barlangban, 2. pont			barlangon kívül		
	min	max	átlag	Min	Max	átlag
T (°C)	9,2	13,3	10,3	-16,9	44,2	10,6
P (mbar)	964	1013	992,1	953,4	1006	982,3
Rh (%)	62,5	99	98,3	27	98	76,3

6. táblázat: A barlangon belül és kívül vizsgált meteorológiai paraméterek (hőmérséklet, légnyomás, páratartalom) a 2009.12.11-2010.12.11. közötti időszakban

(hőmérséklet, légnyomás, páratartalom) egy évre (2009.12.11-2010.12.11.) vonatkozó minimum, maximum és átlag értékei a barlangon belül a 2. mérési ponton (radonmonitor által mért adatok) és a barlangon kívül. (Meg kell jegyezni azonban, hogy a 2. mérési ponton 2010. 04.23-2010.15.30. a külső mérési helyszínen pedig 2010.07.15-2010.07.30. között technikai problémák miatt a mérés szünetelt).

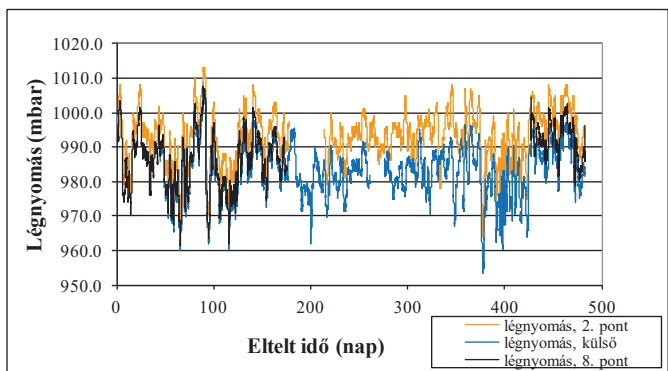
2009.12.11-2010.04.21.	T _{átlag} (°C)	P _{átlag} (mbar)	Rh _{átlag} (%)
barlangban, 2. pont	9.9	991.4	97.6
barlangban, 8. pont	2.1	984.8	85.3
barlangon kívül	2.6	983.1	75.6

7. táblázat: A három különböző helyszínen (barlangon kívül, barlangon belül a 2. és 8. mérési ponton) mért meteorológiai adatok (hőmérséklet, légnyomás, páratartalom) átlagértékeinek összehasonlítása a 2009.12.11-2010.04.21. közötti időszakra vonatkozóan

(erre az időszakra van adatunk mindhárom mérési helyszínről).

Légnyomás adatok vizsgálata

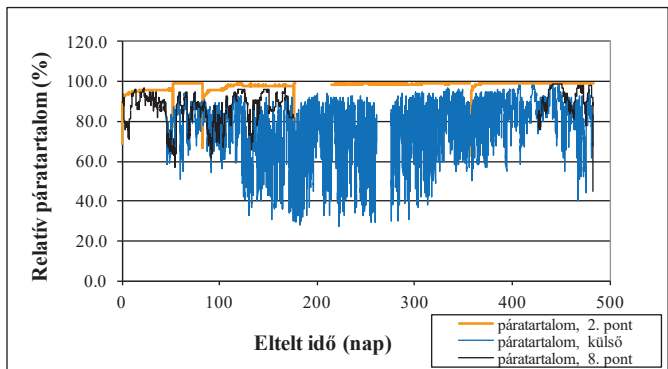
A barlangon kívül, a barlangon belül a 2. mérési ponton és a barlangon belül a 8. mérési ponton mért légnyomás értékek időbeli változása nagyon hasonló képet mutat (23. ábra). A görbék egymással párhuzamosan futnak. Ugyanabban az időszakban (2009. 12. 11-2010. 04. 21.) a barlang bejáratától tovább lévő pontján (2. mérési pont) mértük a legnagyobb légnyomás értékeket (átlagosan 991 mbar), a barlang huzatos pontján (8. mérési pont) és a barlangon kívül mért átlagérték között ~2 mbar a különbség (7. táblázat).



23. ábra: A különböző helyszíneken (barlangon kívül, barlangon belül a 2. és 8. mérési ponton) mért légnyomás értékek változása a hosszú távú (2009.10.27-2011.02.22.) mérés során

Relatív páratartalom vizsgálata

A relatív páratartalom értéke a barlang 2. mérési pontján a bejáratától távolabb stabil volt (leszámítva a műszercsere miatti alkalmazkodási időt), a mérés teljes ideje alatt 98 % körüli értéket mutatott. A huzatos ponton (8. mérési pont) az értéke a külső páratartalommal párhuzamosan változott, de annál kissé nagyobb értékeket mutatott (ugyanabban az időszakban a barlangon kívül 76 %, a 8. mérési ponton 85 %, a 2. mérési ponton pedig 98 % volt a relatív páratartalom átlagos értéke) (7. táblázat). A mérés ideje (2009. 10. 27-2011. 02. 22.) alatt a külső páratartalom 27-98 % között változott (6. táblázat).



24. ábra: A különböző helyszíneken (barlangon kívül, barlangon belül a 2. és 8. mérési ponton) mért hrelatív páratartalom értékek változása a hosszú távú (2009.10.27-2011.02.22.) mérés során

Általános korrelációs vizsgálat

Hogy megvizsgáljuk és számszerűsítsük a radonkoncentráció és a meteorológiai paraméterek közötti, illetve az egyes meteorológiai paraméterek egymáshoz viszonyított kapcsolatát, korrelációs vizsgálatot végeztünk. A korrelációs mátrix a 41. ábrán látható. Az első oszlopban és a legfelső sorban a radonmonitor által mért hőmérséklet, légnyomás, páratartalom és radonkoncentráció, illetve a külső és belső meteorológiai állomás által mért hőmérséklet, légnyomás és páratartalom szerepelnek. A mátrixot excel program segítségével készítettük el és a korreláció vizsgálatához a teljes másfél éves adatsorokat használtuk.

A $\sim 0,9$ -nél nagyobb Pearson-féle korrelációs együttható értékeket narancssárgával, a $\sim 0,7$ -nél nagyobbakat zölddel jelöltem. $0,9$ körüli korrelációs együtthatók csak a három különböző helyszínen mért légnyomás értékek esetében tapasztalhatók. Ezek közül a barlangon belül a 2. és 8. mérési ponton elhelyezett műszerekről leolvasott adatok mutatták a legerősebb korrelációt ($R^2=0,99$). A három légnyomás idősor közötti leggyengébb kapcsolat ($R^2=0,89$) pedig a külső légnyomás és a barlang bejáratától távolabbi pontján (2. mérési pont) mért nyomás értékek között látható.

A különböző helyszíneken mért hőmérséklet értékek és a radonkoncentráció és külső hőmérséklet között $0,7$ körüli korrelációs koefficiens érték figyelhető meg. A három hőmérséklet idősor közül a külső hőmérséklet és a barlang huzatos pontján (8. mérési pont) mért hőmérséklet mutatja a legszorosabb kapcsolatot ($R^2=0,77$). A barlang bejáratától távolabbi pontján, a 2. mérési ponton a hőmérséklet értéke alig változott, azonban ez a kis változás is érzékenyen követte a külső hőmérséklet változásait, a két helyszínen mért hőmérsékleti adatok közötti korrelációs együttható $0,69$. Ennél alig kisebb ($R^2=0,68$) a barlangon belül két ponton (2. és 8. mérési pont) mért hőmérséklet értékek közötti lineáris kapcsolat.

A korrelációs mátrix első oszlopa (25. ábra) szerint a radonkoncentráció értékei a hőmérséklet értékekkel vannak leginkább összefüggésben. Ennek megfelelően a legszorosabb lineáris kapcsolat a radonkoncentráció és a külső hőmérséklet között figyelhető meg ($R^2=0,76$) (NAGY et al., 2012).

Érdekes még a radonkoncentráció és páratartalom közötti összefüggés vizsgálata. A korrelációs koefficiens értéke a radonkoncentráció és a három helyszínen mért relatív páratartalom között minden esetben $\sim 0,2$ közötti értéket mutat, azonban míg a barlangon belül mért páratartalmak esetében az előjel pozitív, a külső páratartalom esetében a korrelációs koefficiens értéke negatív (25. ábra). Ezt a gyenge ellentétes kapcsolatot a 24. ábra mutatja.

Meg kell jegyezni azonban, hogy az $R^2=0,2$ nagyon kicsi érték, a páratartalom valószínűleg nem befolyásolja a radonkoncentráció értékét.

	Rn	R-press	R-hum	R-temp	I-press	I-hum	I-temp	O-press	O-hum	O-temp
Rn (Bq/m ³)										
RPress (mbar)	-0.025									
RHum (%)	0.201	-0.058								
RTemp (°C)	0.580	-0.114	-0.061							
IPress. (hPa)	-0.096	0.993	-0.068	-0.204						
IHum (%)	0.200	-0.030	0.224	0.029	-0.039					
ITemp. (°C)	0.354	-0.077	-0.458	0.675	-0.059	0.231				
OPress. (hPa)	-0.061	0.896	-0.129	-0.204	0.984	-0.119	-0.140			
OHum (%)	-0.239	-0.143	0.086	-0.023	-0.113	0.255	-0.269	-0.195		
OTemp. (°C)	0.762	-0.037	0.192	0.693	-0.151	0.521	0.765	-0.089	-0.451	

25. ábra: Mért idősorok közötti korreláció vizsgálat

Jelölések:

Rn: radonkoncentráció

R-Press: AlphaGuard radonmonitor által mért légnyomás (2. mérési/mintavételezési pont)

R-Hum: AlphaGuard radonmonitor által mért relatív páratartalom (2. mérési pont)

R-Temp: AlphaGuard radonmonitor által mért hőmérséklet (2. mérési/mintavételezési pont)

I-Press: barlangon belül a 8. pontban elhelyezett meteorológiai állomás által mért légnyomás

I-Hum: barlangon belül a 8. pontban elhelyezett meteorológiai állomás által mért relatív páratartalom

I-Temp: barlangon belül a 8. pontban elhelyezett meteorológiai állomás által mért hőmérséklet

O-Press: barlangon kívül elhelyezett meteorológiai állomás által mért légnyomás

O-Hum: barlangon kívül elhelyezett meteorológiai állomás által mért relatív páratartalom

O-Temp: barlangon kívül elhelyezett meteorológiai állomás által mért hőmérséklet

6.3. Radonkoncentráció forrása

6.3.1. Fizikai vizsgálatok

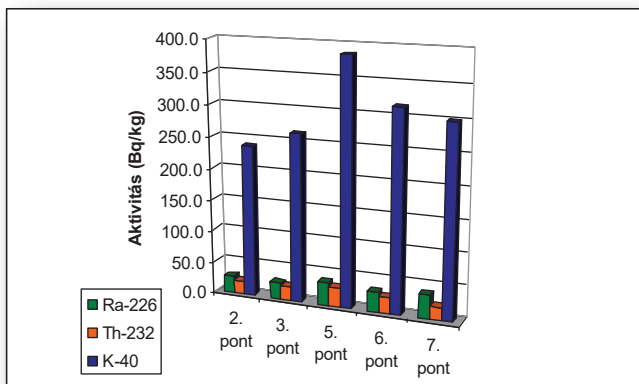
Barlangi agyag felszínéről származó minták radioaktív izotóptartalma

A Pál-völgyi-barlangban hat pontról (2., 3., 5., 6., 7. mérési/mintavételezési pont) gyűjtöttünk mintákat a felszínközeli agyagos kitöltésből. A 6. pontról származó agyagminta Budai Márgán, a többi pontról gyűjtött minta Szépvölgyi Mészkövön képződött. A teljes minták fajlagos ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K aktivitását laboratóriumban határoztuk meg, miután szobahőmérsékleten szárítottuk őket. Az eredmények átlagos talajokra jellemző értékeket mutattak (UNSCEAR, 2008). A mészkövön képződött agyagból vett minták fajlagos ^{226}Ra aktivitás értéke 26-39 Bq/kg, a ^{232}Th 20-31 Bq/kg, a ^{40}K pedig 239-386 Bq/kg közötti értéket mutatott. A márgán képződött agyagból vett minta fajlagos ^{226}Ra aktivitása 32 Bq/kg, a ^{232}Th 26 Bq/kg, a ^{40}K pedig 315 Bq/kg volt (8. táblázat). A minták származási helye (a barlang

Szép völgyi Mészkőben és Budai Márgában elhelyezkedő szakasza) és fajlagos ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K aktivitásai között nem tapasztaltunk összefüggést, a mészkővön és a márgán képződött agyagok radioaktív izotóptartalma nem mutatott számottevő különbséget.

		^{226}Ra		^{232}Th		^{40}K	
Minta	Származási hely	(Bq/kg)	±	(Bq/kg)	±	(Bq/kg)	±
2. pont	mészkő	26,9	4	21,3	1	239,3	8
3. pont	mészkő	25,7	4	22,3	1	264,5	9
5. pont	mészkő	37,0	5	30,8	2	386	11
6. pont	márga	31,6	4	25,8	1	315,3	9
7. pont	mészkő	38,5	3	20,4	1	299,9	9
referencia	talaj	32		45		412	

8. táblázat: Barlangi agyagminták gamma spektroszkópiával meghatározott fajlagos ^{226}Ra -, ^{232}Th - és ^{40}K aktivitása



26. ábra: Barlangi agyagminták gamma spektroszkópiával meghatározott fajlagos ^{226}Ra -, ^{232}Th - és ^{40}K aktivitásának változása az egyes mintavételi pontokon

Fűrésből származó agyagminták radioaktív izotóptartalma

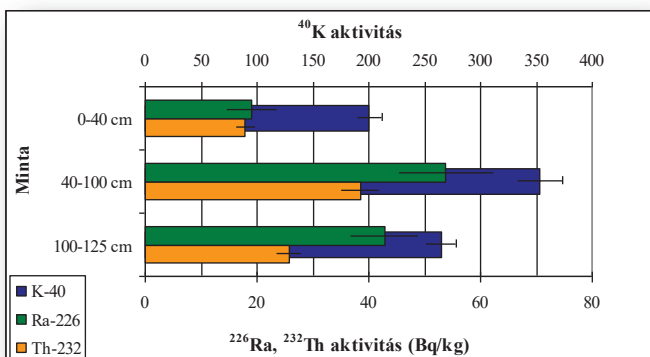
2. Mintavételi ponton mélyített fűrés

A Pál-völgyi-barlangban az agyagos réteg vastagsága két mintavételi ponton volt megfelelő fűrészes mintavételezésre. A 2. mintavételi ponton 125 cm-ig sikerült fűrészt mélyíteni. Fizikai tulajdonságai alapján (elsősorban szín, durvaság) a 2. ponton végzett fűrészből származó „fűrómagot” három mintára osztottuk (0-40 cm: PB2F1A, 40-100 cm: PB2F1B, 100-125 cm:

PB2F1C). A minták fajlagos ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K aktivitását laboratóriumban határoztuk meg. Az eredmények a 9. táblázatban és a 27. ábrán láthatók. A ^{226}Ra esetében 19-54 Bq/kg között, a ^{232}Th esetében 18-39 Bq/kg között a ^{40}K esetében pedig 200-353 Bq/kg között változtak az eredmények (9. táblázat). Mindhárom vizsgált izotópra nézve a középső, 40-100 cm-es mélységközből származó minta rendelkezett a legnagyobb fajlagos aktivitással (27. ábra).

Minta	Mélység	^{226}Ra (Bq/kg)	±	^{232}Th (Bq/kg)	±	^{40}K (Bq/kg)	±
2A	0-40 cm	19,0	5	17,9	2	200,2	11
2B	40-100 cm	53,8	9	38,5	4	352,7	20
2C	100-125 cm	42,8	6	25,7	2	264,5	13

9. táblázat: A 2. pontban mélyített fúrásból származó barlangi agyag fajlagos ^{226}Ra -, ^{232}Th - és ^{40}K aktivitása



27. ábra: A 2. pontban mélyített fúrásból származó barlangi agyag fajlagos ^{226}Ra -, ^{232}Th - és ^{40}K aktivitásának változása a mélységgel

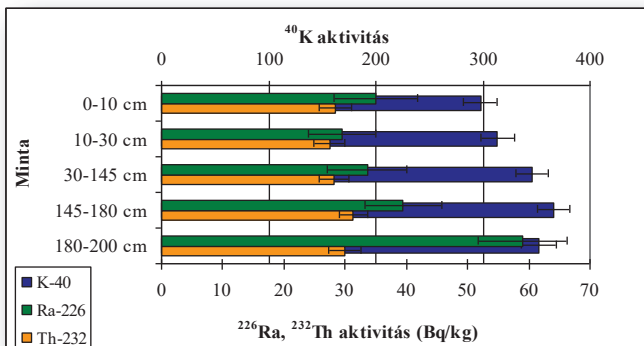
5. Mintavételi ponton mélyített fúrás

A vizsgált barlangszakasz 5. mintavételezési pontjában a barlangi agyagos rétegben 200 cm-ig sikerült fúrást mélyítenünk. Fizikai tulajdonságai alapján (szín, durvaság) az 5. ponton végzett fúrásból származó „fűrőmagot” öt mintára osztottuk (0-10 cm: PB5F1A, 10-30 cm: PB5F1B, 30-145 cm: PB5F1C, 145-180 cm: PB5F1D, 180-200 cm: PB5F1E). Az agyagminták fajlagos ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K aktivitását laboratóriumban határoztuk meg. Az eredményeket a 10. táblázatban és a 28. ábrán foglaltam össze a ^{226}Ra esetében 30-59 Bq/kg között, a ^{232}Th esetében 28-31 Bq/kg között a ^{40}K esetében pedig 298-365 Bq/kg között változtak az aktivitás értékek (10. táblázat). A ^{232}Th fajlagos aktivitása a mélységgel alig változik, a ^{226}Ra esetében a legmélyebből származó minta rendelkezik a legnagyobb fajlagos

aktivitással, de nem figyelhető meg a mélység és az aktivitás értékeinek párhuzamos növekedése, a ^{40}K aktivitása a felső négy szintben a mélységgel enyhe növekedést mutat, azonban a legmélyebbről származó mintának az aktivitása kisebb, mint az egy mélységközzel felette lévő mintáé (28. ábra). A két fűrészből vett agyagminta radioaktív izotóptartalma a barlangi agyag felszínéről vett minták ^{226}Ra , ^{232}Th és ^{40}K tartalmával egy nagyságrendbe esik.

Minta	Mélység	^{226}Ra (Bq/kg)	±	^{232}Th (Bq/kg)	±	^{40}K (Bq/kg)	±
5A	0-10 cm	35,0	7	28,4	3	297,6	15
5B	10-30 cm	29,6	6	27,4	3	313,4	16
5C	30-145 cm	33,6	7	28,1	3	345,9	15
5D	145-180 cm	39,4	6	31,4	2	365,9	15
5E	180-200 cm	59,1	7	30,0	3	352,0	17

10. táblázat: Az 5. pontban mélyített fűrészből származó barlangi agyag fajlagos ^{226}Ra -, ^{232}Th - és ^{40}K aktivitása



28. ábra: Az 5. pontban mélyített fűrészből származó barlangi agyag fajlagos ^{226}Ra -, ^{232}Th - és ^{40}K aktivitásának változása a mélységgel

Kőzetminták (kőzetalkotók) radioaktív izotóptartalma

A két darab kőzetminta (egy mészkő és egy márga) és az egy darab kalcit (nem kőzet, de a korábban jelzetteknek megfelelően itt mutatom be) fajlagos ^{226}Ra , ^{232}Th és ^{40}K aktivitása kis értékeket mutat (11. táblázat), a rádiumra nézve 9-13 Bq/kg, tóriumra 2-5 Bq/kg, káliumra vonatkozóan pedig 9-34 Bq/kg között változott (11. táblázat). Irodalmi adatok alapján mészkövek átlagos ^{226}Ra tartalma 25 Bq/kg (NAZAROFF & NERO, 1988). Mind a mészkő, a márga és a kalcit is ennél kisebb ^{226}Ra aktivitás értéket mutatott.

	²²⁶ Ra		²³² Th		⁴⁰ K	
Kőzet/kőzetalkotó	(Bq/kg)	±	(Bq/kg)	±	(Bq/kg)	±
kalcit	8,8	2	1,7	0,5	8,5	2
márga	11,2	2	2,7	0,5	17,1	2
mészkö	13,1	2	5,4	0,6	33,5	3

11. táblázat: Kalcit-, mészkö- és márgaminták gamma spektroszkópiával meghatározott fajlagos ²²⁶Ra-, ²³²Th- és ⁴⁰K-aktivitása

Barlangi agyag felszínéről származó agyag radon és toron kibocsátása

A barlangi agyag felszínéről vett minták radon és toron kibocsátás értékeit a 12. táblázatban foglaltam össze. Jelentős különbség figyelhető meg a kétféle kőzetben képződött agyakok kibocsátása között. A mészkövön felhalmozódott agyakok esetében értéke 12-21 mBq/kg-h volt, a márgán képződött agyag radon kibocsátása 90 mBq/kg-h (12. táblázat).

		²²² Rn	²²⁰ Rn
Minta	Származási hely	(mBq/kg-h)	(Bq/kg-h)
2. pont	mészkö	12,1±1	44,9±5
3. pont	mészkö	14,4±1	26,9±3
5. pont	mészkö	14,4±1	107,7±11
6. pont	márga	90±9	71,8±7
7. pont	mészkö	21,1±2	300,7±30

12. táblázat: Barlangi agyagminták radon és toron kibocsátásának eredményei

Fűrásból származó agyagminták radon és toron kibocsátása

2. ponton mélyített fűrás

A 2. ponton mélyített fűrásból származó agyagminták radon kibocsátása az agyagos kitöltés felszínéről gyűjtött agyagminták eredményeihez hasonló értékeket mutatott (9-15 mBq/kg-h között változott) (13. táblázat). A minták gamma-spektroszkópiai vizsgálata során megfigyelt eredményekhez hasonlóan (9. táblázat) a kibocsátás mérése során is azt tapasztaltuk, hogy a középső, 40-100 cm-es szintben figyelhetők meg a legnagyobb értékek, itt a tórium kibocsátás is jelentősen meghaladja a barlangi agyag felszínéről vett mintákra jellemző értékeket (12. táblázat).

Minta	Mélység	^{222}Rn (mBq/kg)	^{220}Rn (Bq/kg)
2A	0-40 cm	9,2±1	285,1±30
2B	40-100 cm	15,2±2	542,6±54
2C	100-125 cm	14,6±2	278,5±28

13. táblázat: A 2. ponton mélyített fúrásból származó agyagminták radon és toron kibocsátásának eredményei

5. ponton mélyített fúrás

Az 5. ponton mélyített fúrásból származó agyagminták radon és toron kibocsátása is egy nagyságrendbe esett az agyagos kitöltés felszínéről és a 2. ponton mélyített fúrásból gyűjtött agyagminták eredményeivel (^{222}Rn : 4-25 mBq/kg, ^{220}Rn : 274-422 Bq/kg között változott) (13. táblázat). A fúrás legfelső, 0-10 cm-es rétegeközéből származó agyagminta rendelkezett a legnagyobb értékekkel, mind a radon, mind a toron kibocsátást tekintve (14. táblázat).

Minta	Mélység	^{222}Rn (mBq/kg)	^{220}Rn (Bq/kg)
5A	0-10 cm	24,6±3	422±40
5B	10-30 cm	14,4±1	309±30
5C	30-145 cm	4±1	328±30
5D	145-180 cm	13,5±1	274±30
5E	180-200 cm	13,1±1	328±30

14. táblázat: Az 5. ponton mélyített fúrásból származó barlangi agyagminták radon és toron kibocsátásának eredményei

Kőzetminták (kőzetalkotók) radon kibocsátása

A begyűjtött, porított kalcit, márga és mészkő radon kibocsátása nagyon kicsi értékeket mutatott, 1,4-2,6 mBq/kg között változott (15. táblázat). Az adat összhangban áll a megfigyelt kis fajlagos ^{226}Ra aktivitással (11. táblázat).

Kőzet/kőzetalkotó	^{222}Rn (mBq/kg)
kalcit	1,4
márga	2,6
mészkő	2,1

15. táblázat: Kőzetminták (kőzetalkotó) radon kibocsátása

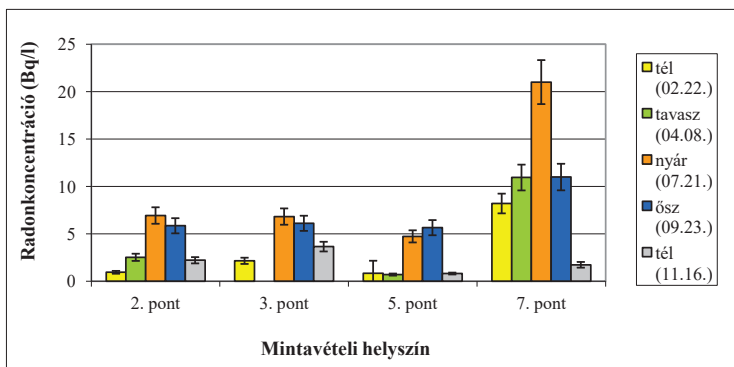
Beszivárgó vizek oldott radontartalma

A radonkoncentráció forrásának vizsgálata során a barlangban megjelenő vizek radontartalmát is meghatároztuk, ugyanis bizonyos esetekben a nagy radonkoncentrációjú vizek is lehetnek a levegő radonkoncentrációjának forrásai (HAKL, 1997). A Pál-völgyi-barlangban csak beszivárgó, csepegő vizeket találunk, amelyek döntően a lefolyó és

közeteken átszivárgó csapadékvízből (eső, hólé) származnak, a barlangban eredő vízforrás nincs (Kiss Attila szóbeli közlése). A vizek oldott radontartalmát az ELTE TTK Atomfizikai Tanszékén folyadékszcintillációs spektrometrívával határoztuk meg.

A barlangba beszivárgó vizekből 2011-ben öt alkalommal (2011. 02. 22., 2011. 04. 08., 2011. 07. 21., 2011. 09. 23., 2011. 11. 16.) vettünk mintát. A barlangban összesen nyolc mérési pontunk van, amelyek a levegő radonkoncentráció mérés alapján lettek kijelölve és ezek közül négy ponton (2., 3., 5. és 7.) (8. ábra) van csepegés, vagyis lehetőség a beszivárgó vizek mintázására.

A mért értékek 0,7-21 Bq/l közötti radonkoncentrációt mutatnak (16. táblázat), a csepegő vizek kis oldott radontartalommal rendelkeznek. A vízminták radontartalmában is megfigyelhető (29. ábra) a levegő radonkoncentrációjára jellemző évszakos változás (CSIGE, 2008). A beszivárgó vizek radonkoncentrációja is nyáron mutatja a legnagyobb, télen a legkisebb értékeket (29. ábra).



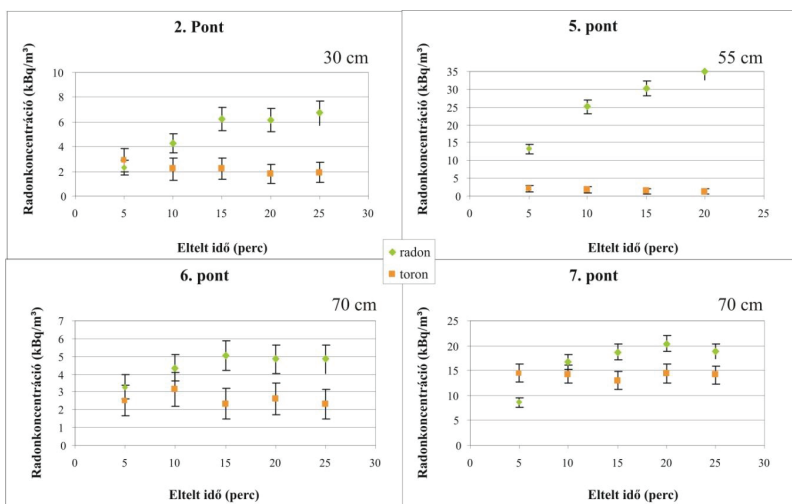
29. ábra: A 2011-ben (02.22-én, 04.08-án, 07.21-én, 09.23-án és 11.16-án) gyűjtött csepegő vizek oldott radontartalma az egyes mérési pontokon

Mintavétel ideje	2011-02-22		2011-04-08		2011-07-21		2011-09-23		2011-11-16	
	C _{Rn}	±	C _{Rn}	±	C _{Rn}	±	C _{Rn}	±	C _{Rn}	±
2. pont	0,95	0,2	2,53	0,4	6,94	0,9	5,86	0,8	2,22	0,3
3. pont	2,16	0,3			6,83	0,9	6,12	0,8	3,66	0,5
5. pont	0,84	1,3	0,71	0,1	4,74	0,6	5,66	0,8	0,82	0,1
7. pont	8,21	1	10,95	1,4	21,02	2,3	11,0	1,4	1,74	0,3

16. táblázat: A különböző mérési pontokon 2011-ben (02.22-én, 04.08-án, 07.21-én, 09.23-án és 11.16-án) vett vízminták oldott radontartalmának eredményei

Barlangi agyag pórusaiban lévő levegő radonkoncentrációja

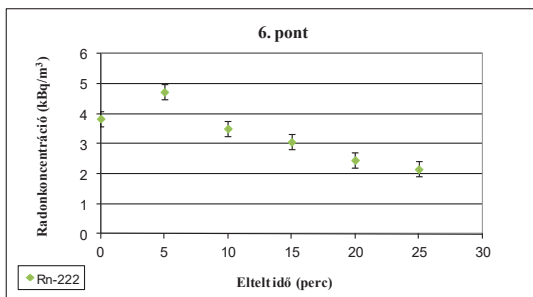
A vizsgálat során a barlang kiépítetlen szakaszán a barlangi agyag pórusaiban lévő levegő radonkoncentrációját határoztuk meg. Az agyagréteg négy ponton (2., 5., 6. és 7. mérési pont), (8. ábra) volt elegendő vastagságú (legalább 30 cm) a mérés elvégzéséhez. A vizsgálati mélység mindig az agyagréteg vastagságától függ az alapkőzetten. A radonkoncentráció esetében mindig megfigyelhető egy jellegzetes növekedés az ún. kezdeti értékről a telítődési értékig. A póruslevegő toronkoncentrációjára ez a növekedés nem jellemző (30. ábra). A mérési adatok alapján megfigyelhető, hogy a műszer (RAD 7) a toronkoncentrációt a radonkoncentrációra jellemző 10-15 %-os hibánál nagyobb hibával (~30-40%) tudja csak megadni.



30. ábra: A barlangi agyag pórusaiban lévő levegő radonkoncentrációja az egyes mérési pontokon

A 2. mérési ponton a verőszondát 30 cm-es mélységbe sikerült lejuttatni. A radonkoncentráció telítődési értéke 6300 Bq/m^3 volt. A pórusokban lévő levegő toronkoncentrációja 2000 Bq/m^3 (30. ábra). A mért értékek az átlagos talajokra (GORJÁNÁ CZ, 2006) jellemző kBq/m^3 -es nagyságrendbe estek. Az 5. ponton a mérést 55 cm-es mélységben végeztük el. 35000 Bq/m^3 -ig növekedett a póruslevegő radonkoncentrációja, ehhez képest a toronkoncentráció értéke kicsit kisebb (1500 Bq/m^3), mint a 2. mérési ponton mért érték. A 6. és 7. mérési ponton a szondát 70 cm mélyre süllyesztettük a barlangi agyagba. A négy mérés közül a 6. ponton tapasztaltuk a legkisebb értékeket; 4800 Bq/m^3 -re nőtt a telítődési érték, a

toron esetében 2500 Bq/m^3 között változott (30. ábra). A legmélyebben található 7. mérési ponton (8. ábra) a barlangi agyag pórusaiban lévő levegő radonkoncentrációja 8500 Bq/m^3 -ről 19000 Bq/m^3 -re nőtt, toronkoncentrációja 14000 Bq/m^3 volt. Az eredményeket összehasonlítva a négy pontról (2., 5., 6., 7. mérési pont) begyűjtött agyagminták fajlagos ^{226}Ra , ^{232}Th aktivitásának (8. táblázat) és ^{222}Rn illetve ^{220}Rn kibocsátásának (12. táblázat) eredményeivel, azt tapasztaljuk, hogy a 6. mérési pont esetében figyelhető meg a legnagyobb különbség az agyag pórusaiban lévő levegő radonkoncentrációja és a begyűjtött minta radon kibocsátása között. A mérés hibájának a lehetősége kizárható, ugyanis a 6. ponton a mérést megismételtük (31. ábra), és a többi ponton tapasztalt értékhez képest ismét kicsi, $2\text{-}3 \text{ kBq/m}^3$ volt a barlangi agyag pórusaiban mérhető radonkoncentráció.

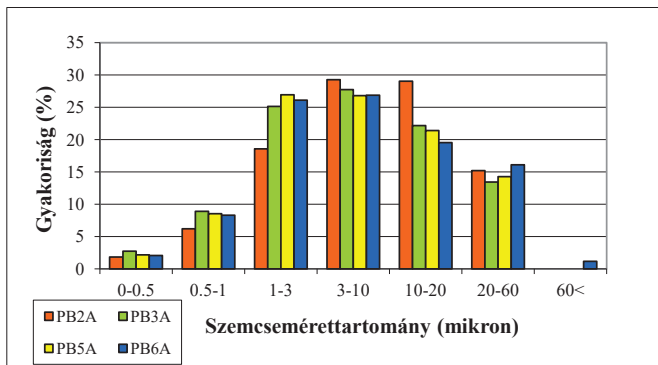


31. ábra: A barlangi agyag pórusaiban lévő levegő radonkoncentrációjának ismételt mérése a 6. mérési ponton

6.3.2. Kőzettani vizsgálatok

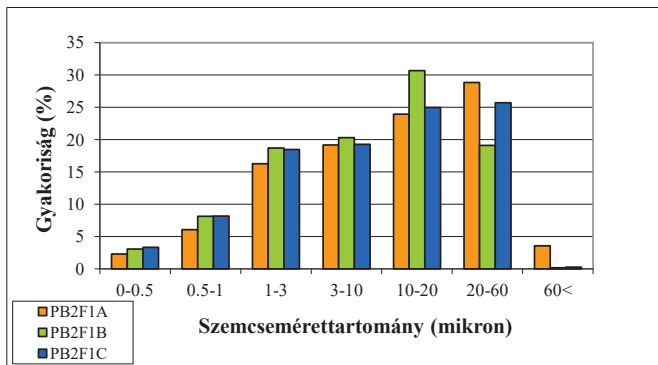
Szemcseméret eloszlás

A barlangi agyag felszínéről a 2., 3., 5., 6. mintavételi pontról származó agyag minták (PB2A, PB3A, PB5A, PB6A) 63 mikronnál kisebb frakciójának szemcseméret eloszlása hasonló képet mutat (32. ábra). Legnagyobb mennyiségben mind a négy mintában a 3-10 mikron közötti szemcseátmérőjű frakció jelenik meg, emellett még az 1-2 és a 10-20 mikrométer közötti tartomány is domináns; az ezeknél kisebb, illetve nagyobb átmérőjű szemcsék jelenléte kevésbé jellemző a vizsgált agyagokra (32. ábra).



32. ábra: Barlangi agyag felszínéről származó minták szemcseméret eloszlása. A narancssárga szín a 2., a zöld a 3., a citromsárga az 5. A kék pedig a 6. mintavételezési pontról gyűjtött mintákat jelöli.

A fúrásból származó agyagminták (2. és 5. mintavételezési ponton mélyített fúrás) szemcseméret eloszlása (33., 34. ábra) más képet mutat, mint a barlangi agyag felszínéről származó mintáké (32. ábra). A 2. pontról származó fúrásból gyűjtött agyagminták esetében a nagyobb szemcsemérettartomány a domináns, legnagyobb mennyiségben a 10-20 és 20-60 mikron átmérőjű szemcsék vannak jelen a mintában, azonban a különböző szintekből vett minták között ebben a két tartományban van a legnagyobb különbség (elsősorban a középső rétegből gyűjtött agyagminta (2B) viselkedik ellentétesen ebben a két szemcseméret frakcióban, mint a felső (2A) és az alsó (2C) szintből vett minták). A középső rétegből gyűjtött agyagminta (2B, 16. ábrán zöld) esetében ugyanis gyakoribbak a 10-20 mikron átmérőjű szemcsék, mint a két szélső rétegben, a 20-60 mikron átmérőjű szemcsék előfordulási gyakorisága azonban kisebb, mint a 2A és 2C mintákban. A többi szemcseméret tartományban a 2A, 2B és 2C minták szemcseméret eloszlása hasonló.

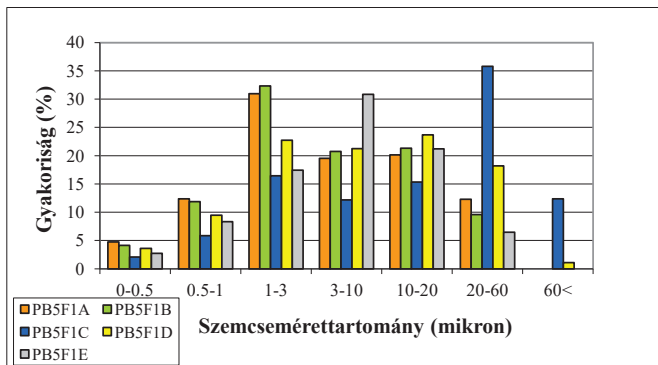


33. ábra: A 2. mérési/mintavételezési ponton mélyített fúrásból származó barlangi agyagminták szemcseméret eloszlása.

A narancssárga szín a felső, a zöld a középső, a kék az alsó rétegből származó mintákat jelöli.

Az 5. ponton mélyített fúrásból származó agyagminták szemcseméret eloszlása mutatja a legváltozatosabb képet (34. ábra). A felső két szintből származó mintában (5A, 5B) az 1-3 mikrométeres frakció a domináns és a két minta szemcseméret eloszlása hasonló. A következő három szintből származó minta (5C, 5D, 5E) szemcseméret eloszlása egymáshoz és az előzőekhez képest is eltérő. A középső szintből vett agyagmintában (5C) a nagy (20-60 mikron) szemcsemérettartomány a meghatározó.

A két alsó szintből vett agyagminta (5D, 5E) szemcseméret eloszlása a barlangi agyag felszínéről vett minták szemcseméret eloszlásához hasonló. A két minta között leginkább a közepes frakciókban jelentkezett különbség. A legmélyebb rétegből vett agyagminta esetében (5E) a 3-10 mikrométeres szemcseméret tartomány volt a legmeghatározóbb, az 5D minta esetében a 1-3, 3-10, 10-20 mikrométeres szemcseátmérő kiegyenlítetten fordult elő.



34. ábra: Az 5. mérési/mintavételezési ponton mélyített fúrásból származó barlangi agyagminták szemcseméret eloszlása. A narancssárga szín a legfelső szintből, a zöld a második szintből, a kék, a középső szintből, a citromsárga a negyedik szintből, a szürke pedig az ötödik, legmélyebb szintből származó mintát jelöli.

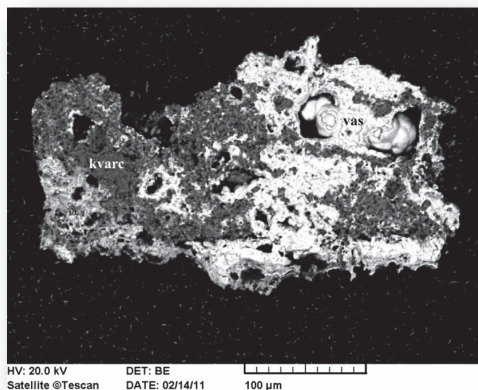
Vékonycsiszolatok tanulmányozása

A pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálat során az előzetesen kiválasztott, a 0,125-0,250 mm-es frakcióból válogatott, feltételezhetően nehéz frakcióba tartozó szemcsék szöveti elemeit és kémiai összetételbeli változatosságát tanulmányoztam. A vizsgálathoz a barlangi agyag felszínéről gyűjtött mintákat és a kőzetminták savazás utáni oldási maradékát használtam. A vizsgálat célja a barlangi agyag és a karbonátok oldási maradéka közötti esetleges eltérések, továbbá a márga és mészkő oldási maradéka közötti különbségek meghatározása volt.

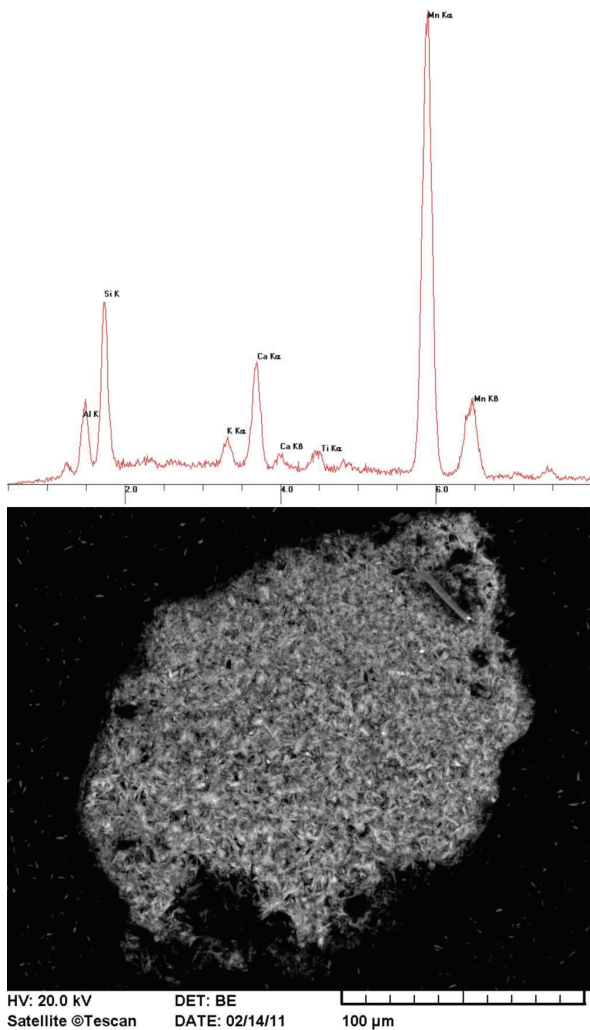
Barlangi agyag felszínéről vett agyagminták

A vizsgált szemcsék általában 100-200 μm nagyságúak, többségük inhomogén, elsősorban kalcit, pirit és kvarc jelenléte jellemző nagy mennyiségben (35. ábra). Valószínűleg közettörmelékek, amelyek az üledékes kőzet keletkezése során lehettek jelen a környezetben. A vas-oxid, vasoxi-hidroxid általában gömbös-vesés-gumós formában figyelhető meg, de előfordul framboidális kinézetű szemcse is (37. ábra). Emellett vegyes összetételű szemcsékkel is találkoztunk, amelyekben a Fe és Si mellett Al, K, Ca, Mn (23. ábra) és bizonyos esetekben Ti is előfordult.

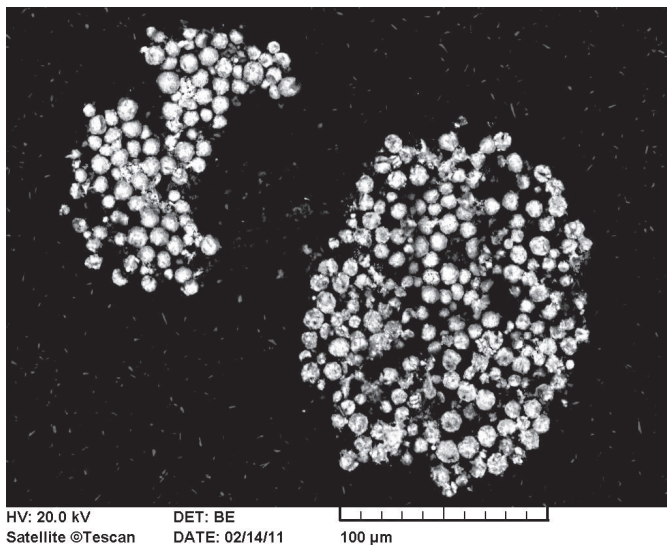
A mészkővön és márgán képződött agyagok közötti különbség a vastartalmú szemcsék előfordulási gyakoriságában jelentkezett. A márgán képződött agyagból származó szemcsék esetében nagyobb arányban fordultak elő vastartalmú és framboidális kinézetű szemcsék.



35. ábra: A Pál-völgyi-barlang 2. mintavételezési pontjáról származó agyagminta egy szemcséjének visszaszórt elektronképe. Kvarc (szürke fázis) és vastartalmú (fehér részek, gömbös szerkezet) szemcse.



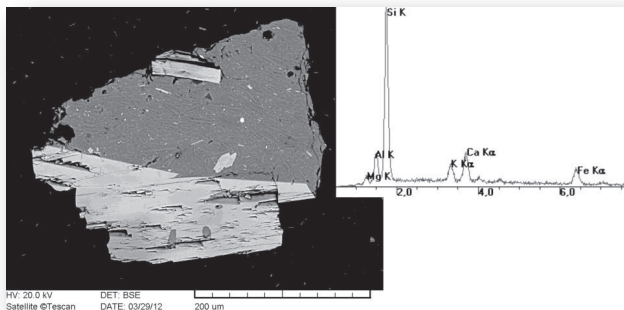
36. ábra: A Pál-völgyi-barlang 5. mintavételezési pontjáról származó agyagminta egy vegyes összetételű szemcséjének visszaszórt elektronképe



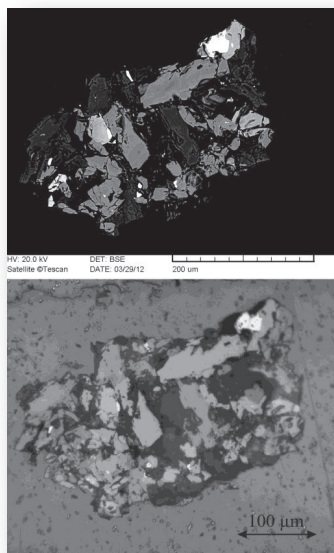
37. ábra: A Pál-völgyi-barlang 6. mintavételezési pontjáról származó agyagminta egy framboidális kinézetű szemcséjének visszaszórt elektronképe

Mészko oldási maradéka

A mészko savazása után a megvizsgált szemcsék nagyon kis eltérést mutattak egymáshoz képest, a szemcsék mérete általában 100-200 μm . Összetételükre az Al, Si, Ca és Fe tartalom volt jellemző, a vizsgált szemcsék kb. felében ezek mellett Mg és K is előfordult, két-három esetben kis mennyiségű titántartalom is megfigyelhető volt (39. ábra). Legtöbb esetben a megfigyelés alapján különböző fázisok is azonos összetétellel rendelkeztek. A szemcsék valószínűleg mind agyagásványok, amelyek pontosabb meghatározására a röntgen diffrakciós elemzés nyújt lehetőséget.



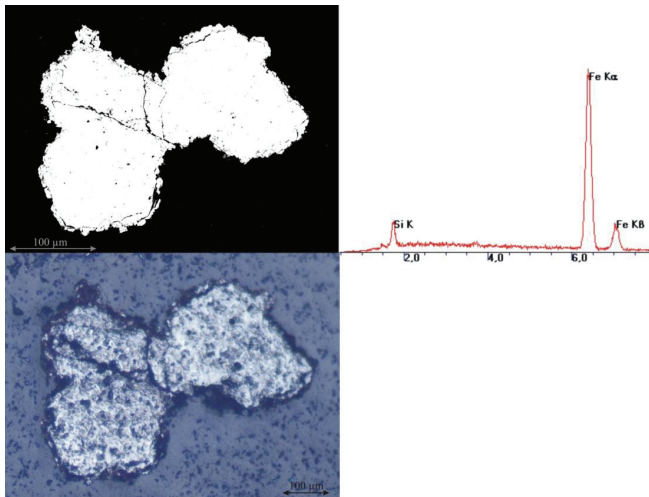
38. ábra: Szépvölgyi Mészke savazás utáni oldási maradékából (0,125-0,25 mm) szeparált szemcse visszashórt elektronképe és karakterisztikus röntgen-spektruma. A képi megjelenés és a felvett spektrum vulkáni kőzetre utal, ami az üledékes kőzet keletkezése során kerülhetett bele.



39. ábra: Szépvölgyi Mészke savazás utáni oldási maradékából származó titán-, kvarc-, vas-oxid- és agyagásvány tartalmú átalakult (magma) kőzetszemcse visszashórt elektronképe (felső) és optikai mikroszkópos képe (alsó).

Márga oldási maradéka

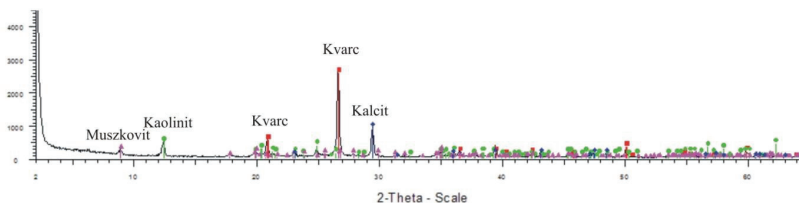
A márgából savazás után visszamaradt anyagból szeparált szemcsék két csoportra oszthatók: vas-tartalmú szemcsék (vas-oxid, vasoxi-hidroxidok) és kvarctartalmú vasas szemcsék (40. ábra). Méretükre szintén a 100-200 μm -es tartomány jellemző.



40. ábra: Budai Márga savazás utáni oldási maradékából származó Fe-tartalmú szemcse visszaszórt elektronképe (felső), optikai mikroszkópos képe (alsó) és röntgen spektruma (jobb felső).

Röntgendiffrakciós elemzés

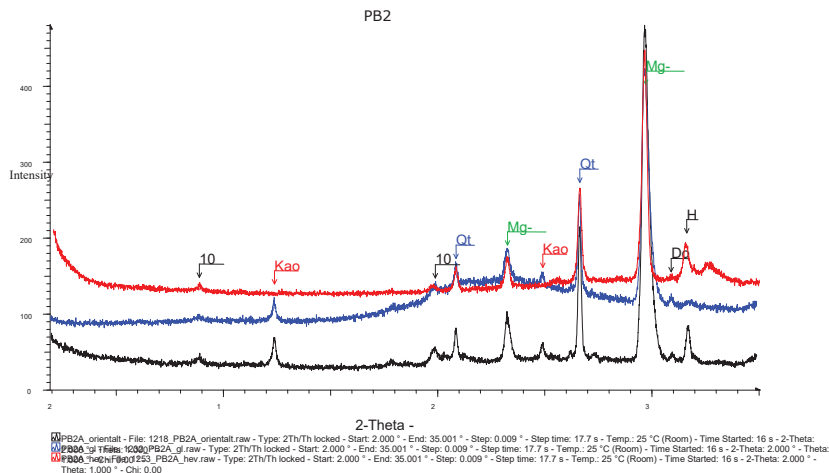
A barlangi agyag felszínéről gyűjtött szárított és porított átlagminták röntgen pordiffrakciós elemzése az egyes minták között nem mutatott jelentős különbséget, a mintákban főleg kvarc, kalcit, kaolinit és muszkovit található (41. ábra).



41. ábra: Az agyagos kitöltés felszínéről a 6. mérési/mintavételezési ponton gyűjtött minta röntgen pordiffrakciós elemzésének eredménye

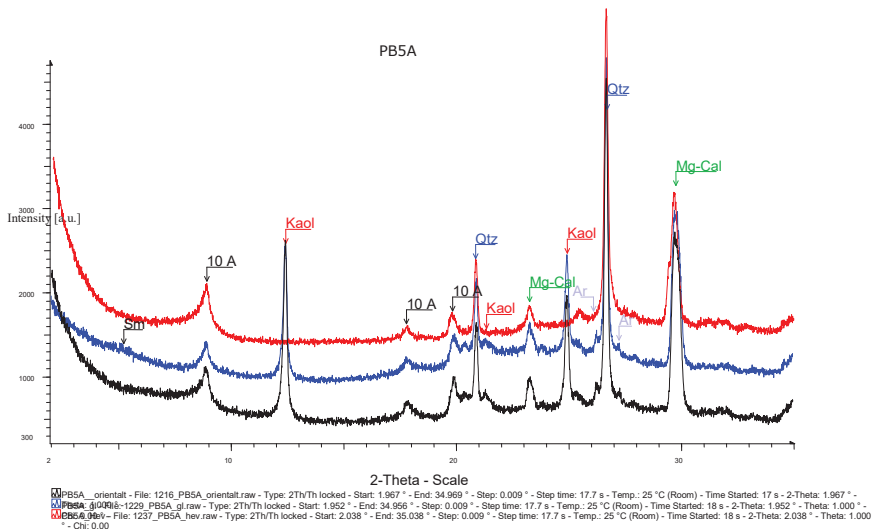
Az orientált preparátumok kvantitatív agyagdiagnostikája során a megvizsgált mintákban kvarc (Qtz), 10 angströmös rétegszilikát (10 Å, nem lehet pontosan megállapítani, hogy illit vagy muszkovit), kaolinit (Kaol), Mg-tartalmú kalcit (Mg-Cal), aragonit (Ar), dolomit (Dol) és szmektit (Sm) jelent meg (42., 43. ábra). Három mintában (2., 3., és 6. mérési/mintavételezési pontról származó minták) halit is megjelent (42. ábra), aminek az eredete kérdéses. Az egyik mintáról pontosan emiatt készítettünk hosszabb felvételt is, ahol szintén megjelenik a halit. A glikolozott mintáknál ez a reflexió majdnem eltűnik, ami arra utal, hogy a halitot a glikol feloldja, de a hevítés után újra megjelenik a felvételen, tehát a mintában valóban jelen van. Előfordulhat, hogy a mintaelőkészítés során került bele valamilyen módon, de az is lehet, hogy nagyon kis mennyiségben eredetileg is jelen volt a mintában, ülepités során a vízben feloldódott, a szárítással pedig bepároltuk.

Az orientált felvételeket egymás fölé helyeztük és jelöltük a reflexiókat. A fekete vonal az orientált, a kék a glikolozott, a piros a hevített minta eredményeit jelzi. A minták agyagásvány összetétele egymáshoz hasonló volt, ezért csak két felvételt, a 2. és az 5. mintavételezési pontról származó agyagminták eredményeit mutatom be (42., 43. ábra).



42. ábra: A 2. mintavételei pontról származó agyagmintából készített orientált preparátum röntgen pordiffrakciós elemzésének eredménye.

A glikolos felvételen látható púp az üvegpúp, ami a minta vastagsága miatt van.



43. ábra: Az 5. mintavételi pontról származó agyagmintából készített orientált preparátum röntgen pordiffrakciós elemzésének eredménye.

A mintában a 17 angström körüli széles, elkent csúcs szmektit egyértelmű jelenlétét jelöli.

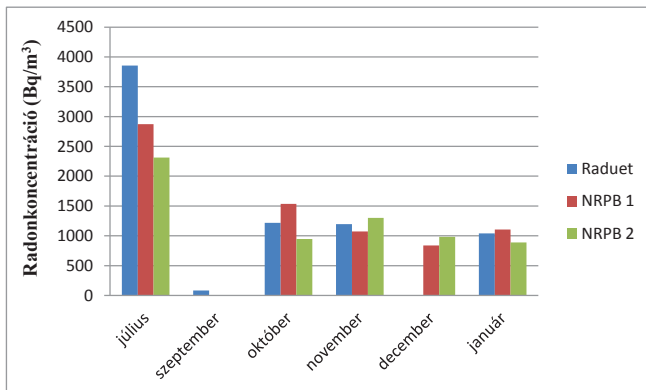
7. MOLNÁR JÁNOS-BARLANG VIZSGÁLATI EREDMÉNYEI

7.1. Radonkoncentráció időbeli változásának vizsgálata passzív detektorral

2011. július 19. és 2012. január 21. között a Molnár János-barlang Kessler termében hat alkalommal helyeztünk ki (1-1,5 hónapra) nyomdetektort (17. táblázat), hogy meghatározzuk a víztér feletti levegő radonkoncentrációját. A Pál-völgyi-barlangban történt mérésekhez hasonlóan itt is többfajta nyomdetektort helyeztünk ki egy mérési periódusban. Sajnos nem mindig volt értékelhető minden detektor eredménye (bizonyos típusú detektoroknak ez volt az első tesztmérése ilyen extrém körülmények között), ezért ebben az esetben három különböző típus, a Radosys Kft. által gyártott Raduet és két különböző NRPB detektorok eredményeit is feltüntettem. A toronkoncentráció értékeket itt sem használtam fel, az adatok ebben az esetben is a kimutathatósági határérték (a Molnár János-barlangban mért radonkoncentráció értékek mellett a toronkoncentráció kimutathatósági határértéke $\sim 1000 \text{ Bq/m}^3$) alatt voltak.

1. periódus	2011.07.19-2011.09.09.
2. periódus	2011.09.09-2011.10.13.
3. periódus	2011.10.13-2011.11.17.
4. periódus	2011.11.17-2011.12.08.
5. periódus	2011.12.08-2012.01.12.
6. periódus	2012.01.12-2012.02.21.

17. táblázat: A Molnár János-barlangban (Kessler terem) elhelyezett nyomdetektorok expozíciós ideje



44. ábra: A radonkoncentráció passzív detektoros vizsgálatának eredményei a Molnár János-barlang Kessler termében

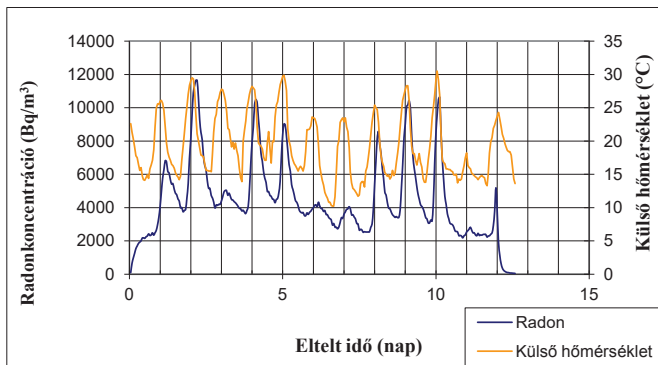
A Kessler teremben végzett radonkoncentráció mérés alapján a három különböző alkalmazott nyomdetektor eredményei között különbségeket figyelhetünk meg, azonban ennek ellenére kirajzolódik egy trend: a radonkoncentráció értéke nyáron itt is nagyobb, míg télen kisebb (44. ábra). A szeptemberi adatok közül sajnos csak a Raduet detektorét tudtuk kiértékelni, aminek az eredménye a nyári időszakhoz és a barlangokra általában jellemző radonkoncentráció értékekhez képest is nagyon kicsi. Feltételezhető, hogy ez valamilyen mérési hibából fakadhat. Ha ezt az adatot nem vesszük figyelembe, a Molnár János-barlang Kessler termében a radonkoncentráció értéke az őszi-téli időszakban is 800 Bq/m^3 feletti értékeket mutat.

7.2. Radonkoncentráció időbeli változásának vizsgálata aktív detektorral

A Molnár János-barlangban kétszer nyílt lehetőség a radonkoncentráció nagy felbontású monitorozására. Először 2011. szeptemberében végeztem egy 12 napos mérést, majd 2011. novemberétől egy több, mint három hónapos mérést. A műszert (AlphaGuard) 1 órás integrációs időköz beállítással alkalmaztam és a Lukács-barlanggal szemben lévő márgába nyúló kis fülkében helyeztem el. A Molnár János-barlangban az aktív és passzív detektoros mérések nem egy helyszínen történtek, mivel az aktív műszert kockázatos lett volna a Kessler teremben kihelyezni.

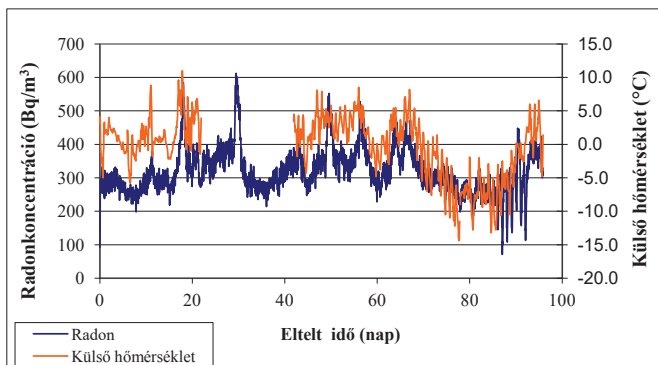
Az első mérés (2011. 09. 09-2011. 09. 22.) eredménye a 45. ábrán látható, a radonkoncentráció időbeli változásait a kék vonal mutatja. Az ábrán (45. ábra) kivehető a radonkoncentráció napszakos periodicitása. A vízszintes tengelyhez tartozó minden egyes függőleges rácsvonal egy-egy napot jelöl (mindig 17 órához tartozik) és minden egyes vonalhoz (naphoz) tartozik egy csúcs. A csúcsok nagysága változó; megfigyelhető 4000 Bq/m^3 -nél kisebb értékű csúcs is, de $\sim 12000 \text{ Bq/m}^3$ nagyságú is. Figyelemre méltó, hogy két egymást követő nap maximum értékei között akár 5000 Bq/m^3 különbség is lehet. A barlangi levegő radonkoncentrációja mindig 20-21 óra körül éri el a maximumát.

A mérés során (2011. 09. 09-2011. 09. 22.) a radonkoncentráció értéke 86 és 11648 Bq/m^3 között változott, 4584 Bq/m^3 -es átlagértékkel. A medián értéke ennél egy kicsit kisebb, 3976 Bq/m^3 , a szórás pedig 2264 Bq/m^3 . A vizsgált időszakban azon a ponton, ahol a radonmonitor elhelyeztük, a barlangi levegő hőmérsékletének átlagértéke 21°C volt.



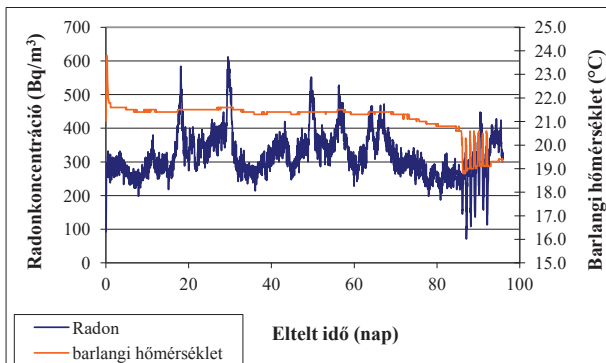
45. ábra: Radonkoncentráció monitorozása a Molnár János-barlangban 2011. szeptemberében

A következő 1 órás felbontással történő radonkoncentráció mérésre a Molnár János-barlangban 2011. november 17. és 2012. február 21. között került sor. A mérés eredményeit a 46. és 47. ábra mutatja be. Az ábrán a kék vonal jelöli a radonkoncentráció időbeli változásait, a narancssárga a hőmérséklet értékeket mutatja. A radonkoncentráció ebben a mérési periódusban már sokkal kisebb, átlaga 319 Bq/m^3 , a medián ettől nem sokkal tért el: 310 Bq/m^3 . Az átlagértékek mellett a minimum (71 Bq/m^3) és a maximum értéke (612 Bq/m^3) is jelentősen lecsökkent az őszi mérés eredményeihez képest és ezekkel párhuzamosan a szórás is kisebb értéket mutat: 67 Bq/m^3 .



46. ábra: Radonkoncentráció monitorozása a Molnár János-barlangban 2011. novemberétől 2012. februárjáig.

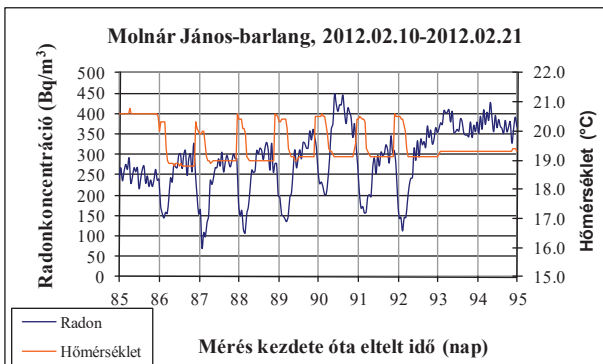
A kék vonal a radonkoncentráció, a narancssárga a külső hőmérséklet értékeinek változását mutatja



47. ábra: Radonkoncentráció monitorozása a Molnár János-barlangban 2011. novemberétől 2012. februárjáig.

A kék vonal a radonkoncentráció, a narancssárga a barlangi hőmérséklet értékeinek változását mutatja (radonmonitor által mért hőmérséklet)

A Molnár János-barlang kiválasztott üregének hőmérséklete a vizsgálat során nem volt állandó, de átlagértéke megegyezett a szeptemberi mérés során tapasztalt átlagértékkel, ami 21 °C volt. A mérés első ~80 napjában először csak nagyon kicsi változások figyelhetők meg, majd a 85. naptól (2012.02.10.) egy ciklikus változás látható, amelyet a radonkoncentráció változása is követ. Ezt az időszakot mutatja a 48. ábra. A rácsvonalak mindig az adott nap 13 órához tartoznak.



48. ábra: A barlangi levegő radonkoncentrációjának és hőmérsékletének változása a Molnár János-barlangban

A 48. ábráról leolvasható, hogy a radonkoncentráció és a hőmérséklet egymással ellentétesen változik, és a hőmérséklethez képest a radonkoncentráció értéke egy kis „késést” mutat. A

hőmérséklet a maximumát 11-16 óra között éri el és legalább két-három órán keresztül tartja is, ennek köszönhető a lapos csúcsok. A radonkoncentráció ennél kicsit később, 16-17 óra körül éri el a minimumát (a hőmérséklet változására reagálva) és azt az értéket csak rövid ideig veszi fel (hegyesebb csúcsok). Az adatok alapján a barlangi levegő hőmérséklete akkor kezd ciklikus változásba, ha értéke ~ 21 °C fok (a barlang átlaghőmérséklete) alá süllyed, ekkor valamilyen irányú légmozgás következik be, aminek következtében a radonkoncentráció értéke is változik. A barlangi levegő hőmérsékletcsökkenésének okára azonban egyelőre nem tudunk magyarázatot adni. A jelenség épp a mérés utolsó szakaszában figyelhető meg, február 10-i kezdettel, amikor a külső levegő hőmérséklete feltehetően már emelkedni kezd, de abban legalábbis biztosak lehetünk, hogy nem kisebb, mint az azt megelőző időszakban (november 17. és február 9. között), tehát a barlangi levegő lehülése nem a külső levegő hőmérséklet-csökkenésének következménye. Valószínűleg éppen a feltételezett külső melegeedés miatt indult be valamilyen folyamat, aminek következtében a barlangi levegő hőmérséklete csökkent.

7.3. Radonkoncentráció forrása

A radonkoncentráció forrásának azonosítása érdekében a Molnár János-barlangban egy a víz alól származó agyagminta fizikai és geokémiai vizsgálatát végeztem el, illetve vízminták oldott radontartalmát vizsgáltam.

7.3.1. Víz alatti agyagminta

Fizikai vizsgálatok

A víz alól vett agyagminta radon és toron kibocsátását, illetve fajlagos ^{226}Ra , ^{232}Th és ^{40}K aktivitását laboratóriumban határoztam meg. A mérés célja az eredmények összevetése a Pál-völgyi-barlangból származó agyagminták adataival és a rádiumtartalom, illetve radonkibocsátás értékeinek viszonyítása a barlangi levegő radonkoncentrációjához. Az eredményeket a 18. táblázatban foglaltam össze. A vizsgált paraméterek a Pál-völgyi-barlangból származó agyagminták (4 db mészkövön és 1 db márgán képződött agyag) (8. táblázat) eredményeihez hasonló értékeket mutattak, amelyek egy nagyságrendbe esnek a talajokra jellemző világtátlagok értékeivel, kivéve a radon anyaelemének, a ^{226}Ra izotópnak a fajlagos aktivitását tekintve, amelynek értéke a Molnár János-barlangból származó agyagminta (márgán képződött agyag) esetében 119 Bq/kg volt (18. táblázat) (talajokra jellemző világtátlag 32 Bq/kg). Ennek köszönhetően a radon kibocsátás is emelkedett értéket

mutat, de a Pál-völgyi-barlangból származó márgán keletkezett agyagos üledék nagyobb radon kibocsátás értéket mutatott (90 mBq/kg, 12. táblázat).

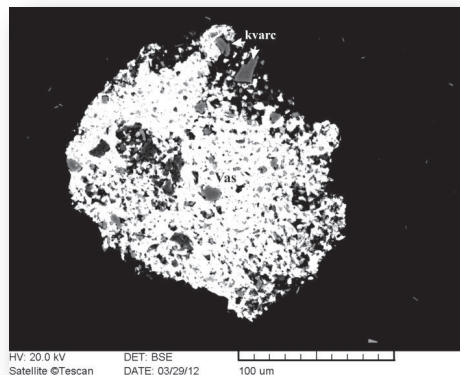
Vizsgált paraméter	Mértékegység	Érték
^{222}Rn kibocsátás	mBq/kg	59±6
^{220}Rn kibocsátás	Bq/kg	155±15
^{226}Ra aktivitás	Bq/kg	118,9±5
^{232}Th aktivitás	Bq/kg	22,6±1,5
^{40}K aktivitás	Bq/kg	213,7±7,1

18. táblázat :A Molnár János-barlangból származó víz alatti agyagminta fizikai vizsgálatának eredményei

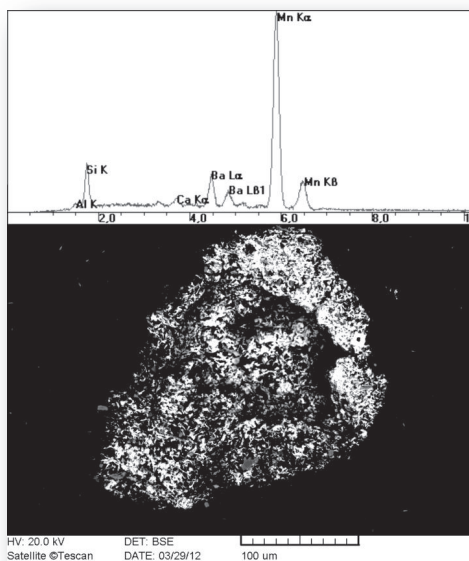
Geokémiai vizsgálatok

A Molnár János-barlangból származó agyagmintát a geokémiai vizsgálatokra történő mintaelőkészítés során nedves szitálással hat szemcseméretfrakcióra osztottam, és a 0,25-0,125 mm átmérőjű frakcióból szemcséket szeparáltam, az ezekből készült vékonycsiszolatokat pedig pásztázó elektronmikroszkóppal vizsgáltam.

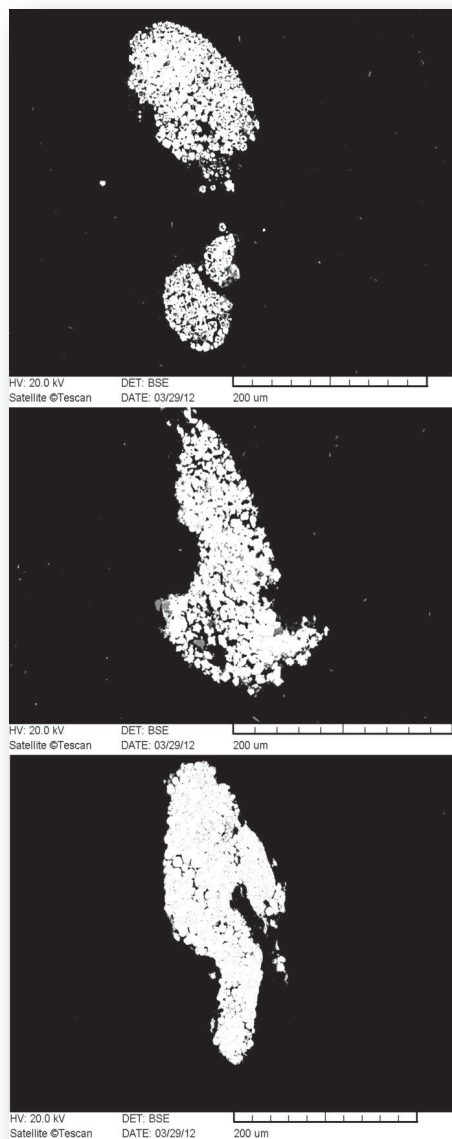
A válogatott szemcsékben találhatunk vas-oxidot, vasoxi-hidroxidot tartalmazó szemcséket, nagy mennyiségben framboidális kinézetű (51. ábra), illetve kvarcot tartalmazó vasas aggregátumot (49. ábra). Ezen kívül tús megjelenésű mangán-tartalmú fázisok jelenléte volt gyakori (50. ábra). A vas-tartalmú fázisok dominanciája és a szemcsék megjelenése alapján a vizsgált szemcsék a Pál-völgyi-barlangból származó márgán képződött agyagmintából származó szemcsékhez hasonló képet mutatnak.



49. ábra: Vas (fényes részek) és kvarctartalmú (szürke fázis) szemcse visszashórt elektronképe, vízalatti agyag, Molnár János-barlang



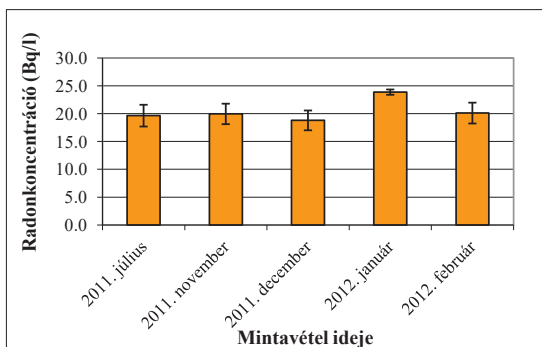
50. ábra: Mangán-gazdag szemcsehalmoz visszashórt elektronképe és röntgen spektruma, vízalatti agyag, Molnár János-barlang



51. ábra: Framboidális kinézetű szemcsékből álló aggregátum visszaszórt elektronképe, vízalatti agyag, Molnár János-barlang

7.3.2. Vízminták radontartalma

A Molnár János-barlang jelentős térfogatát kitöltő, a barlangot folyamatosan formáló ~23-26 °C-os hévízből öt különböző alkalommal vettem mintát. A vízminták radonkoncentrációjának szórása (1,97) az átlagos radonkoncentráció (20,5 Bq/l) 9,6 %-a. Az oldott radontartalom ezek alapján nem mutat szezonális váltakozást, mind az öt mintavétel során ~20 Bq/l volt a vizek radonkoncentrációja (52. ábra).



52. ábra: Molnár János-barlangból származó vízminták oldott radontartalma

8. HIDEG-LYUK ÉS HARCSASZÁJÚ BARLANGOK VIZSGÁLATI EREDMÉNYEI

Ma már a Hideg-lyuk és a Harcsaszájú-barlang is a Pál-völgyi-Mátyáshegyi-barlangrendszer részét képezik. Ugyanolyan geológiai formációkban, azonos geológiai folyamatok során keletkeztek, mint a Pál-völgyi-barlang.

A Hideg-lyukból három, a Harcsaszájú-barlangból két agyagmintát vizsgáltunk. A mérések során a minták fajlagos ^{226}Ra , ^{232}Th és ^{40}K aktivitását és radon, illetve toron kibocsátását határoztuk meg laboratóriumi körülmények között.

A minták ^{226}Ra aktivitása 23-29 Bq/kg között, ^{232}Th aktivitása 12-22 Bq/kg között, ^{40}K aktivitása pedig 93-260 Bq/kg között változott. Az eredmények a Pál-völgyi-barlangból származó barlangi agyag felszínéről vett minták eredményeivel nagy hasonlóságot mutatnak, elsősorban a ^{226}Ra aktivitására vonatkozóan, a ^{232}Th és ^{40}K egy kicsit csökkent értékeket mutat (19. táblázat).

Minta	^{226}Ra		^{232}Th		^{40}K	
	Bq/kg	±	Bq/kg	±	Bq/kg	±
HLY1	0,	2,0	16,9	0,9	186,5	4,7
HLY2	25,1	1,8	11,9	0,8	121,0	4,2
HLY3	22,5	1,8	16,6	0,9	149,4	4,4
HSZ1	28,7	2,2	22,4	1,0	93,0	2,2
HSZ2	28,4	1,9	18,3	0,9	259,3	5,8

19. táblázat: A Hideg-lyukból (HLY1, HLY2, HLY3) és Harcsaszájú-barlangból (HSZ1, HSZ2) származó agyagminták fajlagos ^{226}Ra , ^{232}Th és ^{40}K aktivitása

A vizsgált agyagminták radon kibocsátása a Pál-völgyi-barlangból származó mintákhoz képest kisebb értékeket mutat, kivéve a Harcsaszájú-barlang 2. pontjáról gyűjtött mintát (20. táblázat). Toron kibocsátás esetében eddig is nagyon nagy különbségeket láttunk, de a vizsgált agyagminták toron kibocsátás értékei az eddig mért értékeknek (tartományoknak) megfelelnek.

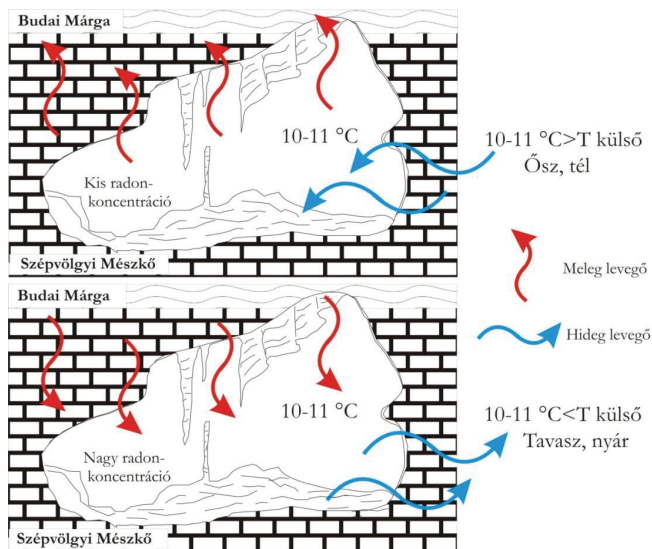
Minta	^{222}Rn (mBq/kg h)	^{220}Rn (Bq/kg h)
HLY1	3,2±0,3	60,8±7
HLY2	5,1±0,5	41,4±4
HLY3	6,1±0,6	111,5±11
HSZ1	6,0±0,6	99,6±10
HSZ2	14,3±1,4	181,6±18

20. táblázat: A Hideg-lyukból (HLY1, HLY2, HLY3) és Harcsaszájú-barlangból (HSZ1, HSZ2) származó agyagminták radon és toron kibocsátása

9. DISZKUSSZIÓ

9.1. Külső hőmérséklet hatása a barlangi levegő radonkoncentrációjára

A párhuzamosan végzett hosszú távú radonkoncentráció monitorozás és meteorológiai paraméterek vizsgálata alapján megállapítottuk, hogy a radonkoncentráció a külső hőmérséklettel mutatja a legszorosabb kapcsolatot a vizsgált meteorológiai paraméterek közül. A külső levegő és a barlangi levegő hőmérséklete közötti különbség hatására alakul ki a barlangi levegő radonkoncentrációjára jellemző évszakos periodicitás.

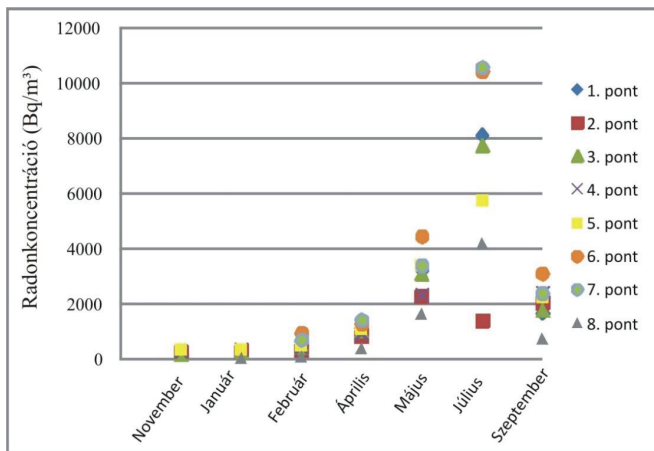


53. ábra: A barlangi levegő radonkoncentrációjának évszakos változása a külső hőmérséklet függvényében a Pál-völgyi-barlangban.

Ha a külső hőmérséklet a barlang állandó hőmérsékleténél (a Pál-völgyi-barlang esetében 10,3 °C) kisebb (elsősorban télen), kívülről befelé áramlik a levegő, így kisebb radonkoncentrációjú levegő érkezik a barlangba. Ellenkező esetben, vagyis ha a külső hőmérséklet meghaladja a barlang állandó hőmérsékletét (főleg nyáron), a levegő a barlangból kifelé áramlik, így a barlangban megnő a levegő radonkoncentrációja. Ennek köszönhető a radonkoncentráció értékének szezonális váltakozása, miszerint a barlangban télen a radonkoncentráció értéke kicsi, nyáron nagy (általában vízszintes barlangokra jellemző). Az őszi és tavaszi időszakban a radonkoncentráció értéke a téli és nyári időszakra

jellemző értékek között mozog. Ez a szezonális más mértékben, de megfigyelhető mind a Pál-völgyi, mind a Molnár János-barlangban.

A barlangi levegő radonkoncentrációjának évszakos periodicitásáért tehát a barlangi és a felszíni levegő hőmérséklet-különbsége felelős. Ez a szezonális a passzív nyomdetektoros mérések eredményeiből is látható.

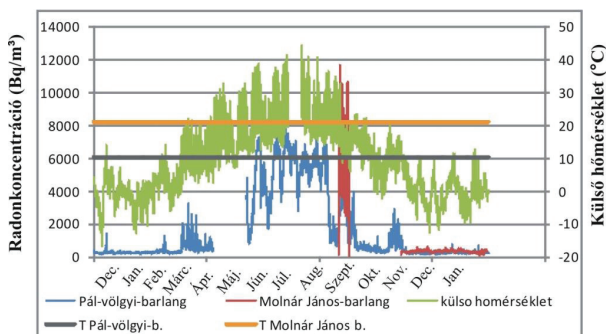


54. ábra: Radonkoncentráció szezonális változásának vizsgálata passzív nyomdetektorokkal a Pál-völgyi-barlangban

Az 54. ábrán a radonkoncentráció szezonális váltakozása a Pál-völgyi-barlang nyolc különböző mérési pontján (8. ábra) egyaránt megfigyelhető. A radonkoncentráció az összes mérési ponton a május-szeptember közötti időszakban éri el a maximumát. Fontos megjegyezni azonban, hogy a maximum értékek között a barlang különböző termeiben igen nagy különbségek lehetnek (több kBq/m^3), amint az 54. ábra mutatja.

Ez a szezonális általában megfigyelhető a legtöbb barlangban (HAKL et al., 1997a; CSIGE, 2008; GREGORIC et al., 2011; SOMLAI et al., 2011). A Molnár János-barlangban azonban a levegő hőmérséklete a környező területre jellemző átlaghőmérsékletet meghaladja; mind a szeptemberi kéthetes, mind a novembertől februárig tartó három hónapos mérés során azt tapasztaltuk, hogy a barlangi levegő hőmérséklete a Molnár János-barlang vizsgált termében (a Lukács-barlanggal szemben lévő márgába nyúló kis fülkében, ahol az aktív detektort elhelyeztük) 21°C . Egész éves radonkoncentráció monitorozásra itt nem nyílt lehetőség, azonban az eredmények alapján feltételezhető, hogy a radonkoncentráció periodicitásában, összehasonlítva pl. a Pál-völgyi-barlanggal egy kis különbség van, hiszen a légmozgás

irányának modell szerinti változása ez esetben nem 10-11 °C-on, hanem 21 °C-nál következik be, a külső hőmérséklet azonban ritkábban éri el ezt az értéket. Az 55. ábra jelzi, hogy míg a külső hőmérséklet értéke gyakorlatilag márciustól október végéig többször meghaladja a Pál-völgyi-barlang hőmérsékletét, a Molnár János-barlang levegőjére jellemző hőmérsékletet, azaz 21 °C-ot csak az áprilistól szeptemberig tartó időszakban éri el, így valószínűleg ennek megfelelően változik a radonkoncentráció értéke is a barlang levegőjében. A Molnár János-barlangban tehát rövidebb ideig tart (gyorsabban lejátszódik) a kihúzó légáramlat és az ennek következtében kialakuló telítődési radonkoncentráció.



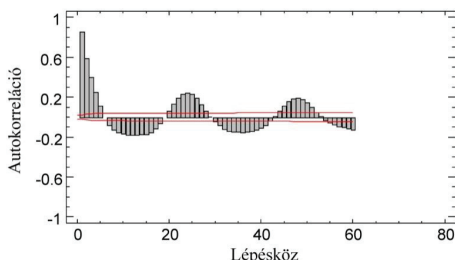
55. ábra: Radonkoncentráció évszakos periodicitásának hőmérsékletfüggése a Pál-völgyi- és a Molnár János-barlangban.

A külső hőmérséklet és a Pál-völgyi-barlang radonkoncentrációjának adatai a 2009. 10. 27-2011. 02. 22. közötti időszakból származnak, a Molnár János-barlangban mért radonkoncentráció értékek 2011. szeptember 10-22 és 2011. november 17-2012. február 21 között lettek felvéve.

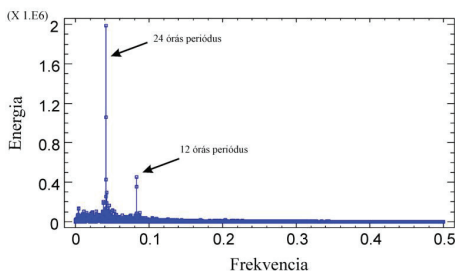
9.2. Barlangi radonkoncentráció napszakos periodicitása a Pál-völgyi-barlangban

Az előző fejezetből kiderült, hogy a barlangi levegő radonkoncentrációjában megfigyelhető egy évszakos periodicitás. A hosszú távú, nagy felbontású mérésnek köszönhetően a Pál-völgyi-barlangban felvett adatsor alkalmas arra, hogy megvizsgáljuk, van-e benne az évszakos periodicitáson kívül más (mivel az adatsor 1,5 éves, ezért egy évnél rövidebb), szabályos ismétlődés. A periodicitás vizsgálathoz Fourier transzformáción alapuló periodogramot és auto-korreláció diagramot használtunk. Az idősor analízist (autokorreláció és periodicitás vizsgálatot) a STATGRAPHICS Centurion XV szoftver segítségével végeztük el. A zaj csökkentése érdekében 5RSSH öt pontos mozgó medián szűrőt, vagyis simítást (low-pass filter) használtunk. Ez a rezisztens szűrő különösen alkalmas a kiugró értékek eliminálására. Az autokorreláció vizsgálat diagramján két maximum figyelhető meg (56.

ábra), az egyik 24, a másik 48 lépésköznél. Mivel 1 mérési ponthoz 1 óra mérési idő járul, ez a két maximum az adatok 24 és 48 órás eltolásakor fennálló hasonlóságot mutatják. Ez a napszakos periódus jele. A periodogramon a 0,041 [1/óra] frekvencia értéknél megjelenő csúcsához tartozó periódus 24 óra ($1/24=0,041$), a 0,083 [1/óra] frekvencia értéknél megjelenő csúcsához tartozó periódus 12 óra ($1/12=0,083$) (57. ábra). Ezek alapján a barlangi radonkoncentráció értékére az évszakos váltakozás mellett napszakos és 12 órás periodicitás is jellemző (NAGY ET AL., 2012).



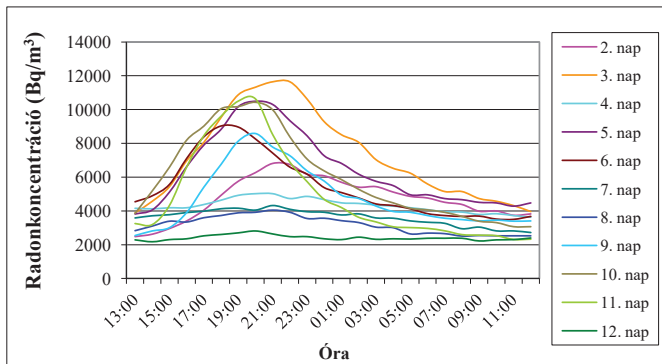
56. ábra: A Pál-völgyi-barlangban végzett hosszú távú (egy éves) radonkoncentráció mérés eredményeinek autokorreláció diagramja az 5RSSH simítás után, mutatva a 24 órás periódust.



57. ábra: A Pál-völgyi-barlangban végzett hosszú távú (egy éves) radonkoncentráció mérés eredményeinek periodogramja az 5RSSH simítás után. A periodogramon jól látszik a 12 és 24 órás periódus.

A radonkoncentráció adatsorában kimutatható határozott napi periodicitás a külső hőmérséklet 24 órás periodicitásával függ össze. Az éjszakai lehűlés és nappali felmelegedés során változhat a barlangi légmozgás iránya, aminek következtében a barlangi levegő radonkoncentrációjának értéke is változik (KÖVÉR, 2007). Ez azonban főleg az átmeneti

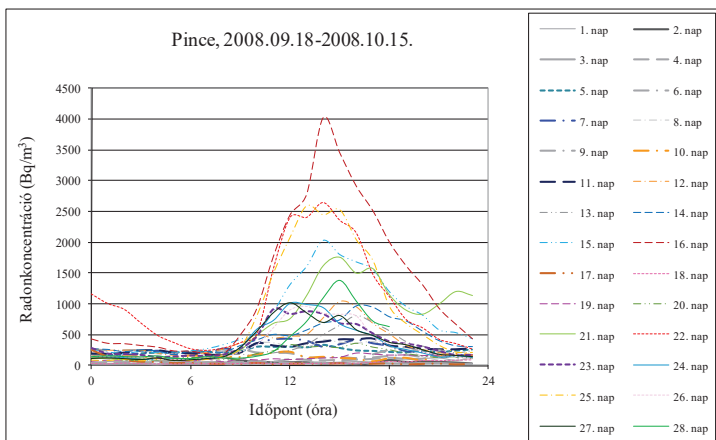
(tavaszi és őszi) időszakokra vonatkozik, ahogy az a Molnár János-barlangban szeptemberben végzett mérés eredményeiből is látható.



58. ábra: A radonkoncentráció napszakos periodicitása a Molnár János-barlangban, 2011. szeptemberében

A 2011. 09. 09-2011. 09. 22. közötti időszakban a Molnár János-barlang Szent Lukács-barlanggal szemben lévő termében 11 napból 8 napon a radonkoncentráció maximuma nagyobb volt 4000 Bq/m^3 -nél (58. ábra) és a legnagyobb értéket mindig 21 óra körül érte el a levegő radonkoncentrációja. A görbék (egy vonal egy nap óránként mért radonkoncentrációját jelöli) kezdeti szakasza (13-19 óra között) a vizsgált napok több, mint a felében kb. azonos meredekséget mutat.

Hasonló napszakos periodicitást figyeltünk meg a radonkoncentráció változásában egy kővágószőlősi épület pincéjében egy korábbi kutatás során (59. ábra) (NAGY et al., 2011). Szintén ősszel végeztünk hosszabb távú (~1 hónap) radonmérést AlphaGuard radonmonitorral, egy órás integrációs időközzel.



59. ábra: Radonkoncentráció napszakos periodicitásának vizsgálata 2008.09.18-10.15. között egy kővágószőlősi épület pincéjében

A radonkoncentráció kisebb értékeket mutat, mint amelyeket a barlangi mérés során tapasztaltunk, ez az épület szellőzésének köszönhető. A vizsgált napok felében figyelhetünk meg 500 Bq/m^3 -nél nagyobb radonkoncentrációt, a maximum elérésére mindig 12-18 óra között kerül sor. A radonkoncentráció a maximális értékét mindig 14 óra körül érte el, míg a barlangban végzett mérés során csak 20 óra körül. Ez a „késés” annak köszönhető, hogy a barlangban a levegőnek nagyobb utat kell megtennie, ezért a felfutás és a lecsengés is később történik, mint a pince esetében. A napi menetek azonban a késés ellenére nagy hasonlóságot mutatnak. A radonkoncentráció 24 órás periodicitásért tehát a külső hőmérséklet periodicitása felelős.

A természetben megfigyelhető jellegzetes, 12 órás periódus az árapály jelenséghez köthető. Maucha kimutatta (MAUCHA, 1967, 1973), hogy az árapály effektus befolyásolja a karsztvizek mozgását. Ennek közvetlen oka a szilárd kontinentális kéreg árapálydeformációjával kapcsolatos, aminek hatására a függőleges törések hézagterfoglata megváltozik. Elképzelhető, hogy a szilárd kéreg árapálydeformációja a kőzetek és a kőzeteket kitöltő/borító agyagok radon-exhalációjára is hatást gyakorol (GROVES-KIRKBY et al., 2006), ami így a barlangi levegő radonkoncentrációjának változásaiban is megfigyelhető.

Felmerülhet az is, hogy a barlangi radonkoncentráció változásában felfedezett 12 órás periodicitás, pusztán a 24 órás periódus első felharmonikusa. Ebben az esetben valószínűleg a további felharmonikusok is (pl. 6 óra) megjelenének. A radonkoncentráció idősorában azonban 6 órás periódus a szűrés (5 RSSH) nélküli adatokban sem lelhető fel.

9.3. Szellőzés vizsgálata a Pál-völgyi-barlangban

9.3.1. Ventillációs index bevezetése

A barlangok élettelen környezeti értékek, ennek ellenére „lélegeznek”, a barlang és környezete között folyamatos a légcseré, amelynek intenzitása fontos jellemzője a barlangoknak (PERRIER et al., 2004).

A radonkoncentráció értéke a barlangban három tényezőtől függ. A terem felületén keresztül történő radon beáramlás (fluxus) következtében a radonkoncentráció értéke a barlangi levegőben nő, két másik tényező azonban csökkenti a radonkoncentrációt. Egyrészt a keletkezett radon λ bomlási állandóval bomlik a teremben, másrészt a barlang szellőzik, ha a külső levegő (szabad levegő) bejut a barlangba, hígítja a barlangi radonkoncentrációt. Valójában erőteljes keveredés jelenléte esetén a radonaktivitás-koncentráció (A) egy teremben (S felszínnel rendelkező, V térfogatú teremben) az időtől függ és leírható a következő egyenlettel (WILKENING & WATKINS, 1976):

$$\frac{dA}{dt} = -\lambda A + \frac{\Phi}{V} \quad 4. \text{ egyenlet}$$

ahol:

S : a vizsgált terem felszínének nagysága

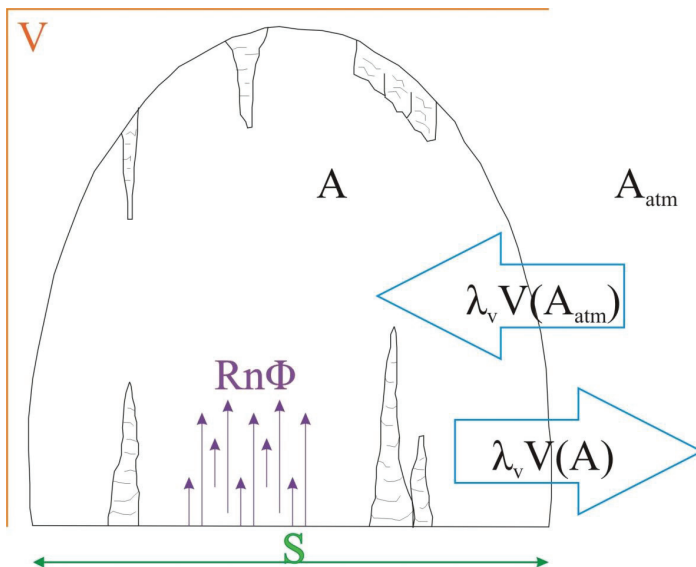
V : a vizsgált terem térfogata

Φ : radon kibocsátás (fluxus) a kőzetek, agyagok felszínén

λ : radon bomlási állandója ()

 : szabad levegő radonkoncentrációja

 : légcseré relatív sebessége (azt jelenti, hogy a terem levegőjének hányad része cserélődik ki a szabad levegővel 1 másodperc alatt)



60. ábra: A barlangi levegő radonkoncentrációjának alakulása. A V térfogattal rendelkező barlangban S nagyságú felületen történik radon fluxus. A kialakuló radonkoncentrációt az atmoszférikus levegővel (külső levegő) történő légcsera hígítja, aminek következtében $\lambda_v V$ térfogatú A aktivitású levegő távozik a barlangból és helyére ugyanakkora, $\lambda_v V$ térfogatú A_{atm} aktivitású levegő érkezik.

Az, hogy a barlang levegőjében mekkora radonkoncentráció tud kialakulni, függ attól, hogy mekkora a radon-fluxus ($[mBq/m^2s]$, azaz egy m^2 -nyi felületről másodpercenként mekkora aktivitás lép ki), mekkora a felület, amin a radon-kibocsátás történik és mekkora a terem térfogata, amiben a radonkoncentráció felhalmozódhat.

Egyensúly esetén $dA/dt=0$

Tehát, ha nem lenne szellőzés és nem lenne bomlás, a jobb oldalon csak egy tag állna:

— — .

Ekkor a radonfluxus (ami esetleg időfüggő) nagysága határozza meg egyedül az aktivitáskoncentráció megváltozását. A levegő radonkoncentrációját azonban ennél több tényező befolyásolja a barlangi levegőben. Egyrészt a keletkezett radon λ bomlási állandóval bomlik, másrészt télen a barlang szellőzik, emiatt a külső levegő ami a barlangba jut, hígítja a barlangi radonkoncentrációt. Ezért az egyenletbe további két tag kerül, amelyek csökkentik a radonkoncentrációt, ezért negatív előjellel szerepelnek.

: ez a tag jelöli azt (a radioaktív bomlás alapegyenletei alapján; $dN/dt = -\lambda N$ és $A = \lambda N$), hogy a radonkoncentráció a barlangi levegőben csökken, mert a radon λ bomlási állandóval bomlik.

: ez a tag pedig a szellőzési tag.

A szellőzési tag származtatása:

V térfogatú, A aktivitáskoncentrációjú levegővel kitöltött teremben a teljes aktivitás AV . A terem szellőzésének köszönhetően $\lambda_v V$ térfogatnyi levegő távozik a teremből, aminek aktivitása $\lambda_v AV$. Az aktivitáskoncentráció csökkenése ezek alapján leírható a következő taggal:

$$dA/dt = -\lambda_v A$$

A szellőzés következtében az A aktivitáskoncentrációjú levegő helyére A_{atm} aktivitású levegő érkezik. A kicserélt levegő térfogata a továbbiakban is $\lambda_v V$. A kívülről behozott aktivitás leírható a következő szerint: $A_{atm} \lambda_v V$.

Az aktivitáskoncentráció növekedése ez alapján: $A_{atm} \lambda_v V / V = A_{atm} \lambda_v$

A bejutott aktivitás tehát:

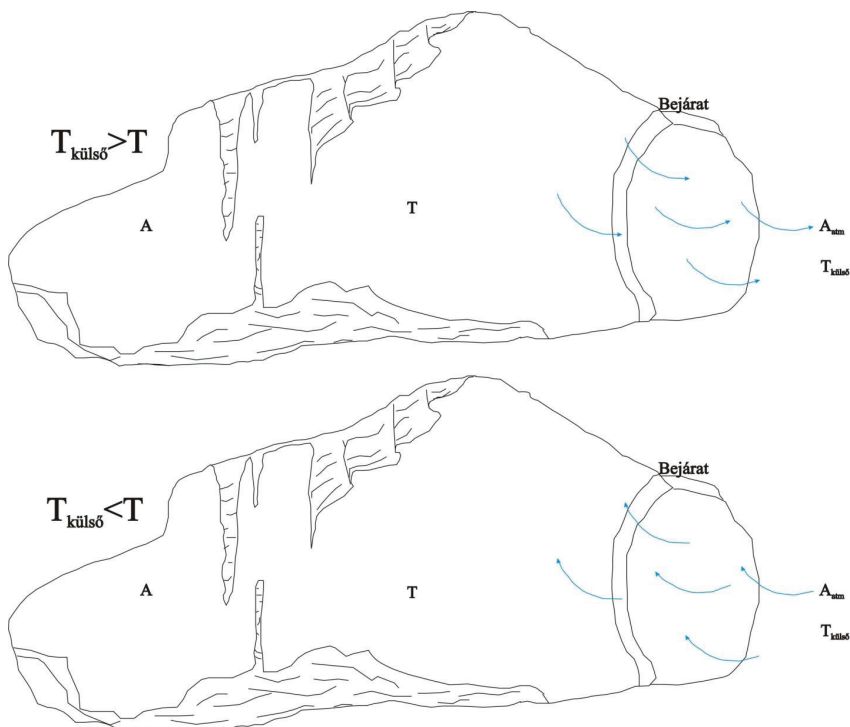
$$dA/dt = \lambda_v A_{atm}$$

Ha a két tagot összeadjuk, akkor $dA/dt = \lambda_v$:

ami kifejezi, hogy mekkora a hígulás, amit a külső levegő és a barlangi levegő radonkoncentrációjának különbsége határoz meg [Bq/m^3].

Nyáron a barlang természetes szellőzése elhanyagolható (PERRIER et al., 2004), mert amikor a külső hőmérséklet nagyobb, mint a barlang állandó hőmérséklete (pl. Pál-völgyi-barlang esetében $\sim 10-11^\circ C$) a levegő belülről kifelé áramlik a bejárat(ok)on keresztül, úgynevezett kihúzó légáramlat van, befelé nem tud levegő áramolni. Az eltávozott levegő helyére a közetek repedésein, résein keresztül érkezik pótlás. Légcseré tehát van nyáron is, de nem kell a bejáraton keresztül érkező külső levegő hígító hatásával számolni. Télen ezzel szemben behúzó légáramlat van, a bejáraton keresztül folyamatos a légcseré. Emiatt a barlangi levegő radonkoncentrációjában megfigyelhető egy jellegzetes évszakos váltakozás, amint ezt korábban részleteztem (53. ábra). A radonkoncentráció értéke a barlangi levegőben nyáron nagyobb, télen kisebb.

A nyári-téli szellőzési arány (a nyári és téli időszakra jellemző átlagos radonkoncentrációk hányadosát jelenti) értékeinek ismeretében kiszámolható az adott terem légcseréjének relatív sebessége.



61. ábra: Kihúzó és behúzó légáramlat alakulása a barlangban a külső hőmérséklet függvényében.

Ha a légcseré relatív sebességét télen állandónak tekintjük, valamint konstans radon fluxust és elhanyagolható külső szabadlevegő radonkoncentrációt (PERRIER et al., 2004) feltételezünk, akkor a téli hónapokra kiszámolhatjuk hogy mekkora (időben állandó) radonkoncentráció alakul ki (amikor $dA/dt=0$ lesz):

$$A_{\text{téli}} = \frac{\bar{A}}{\bar{A}_{\text{nyári}}}$$

A nyári radontartalom maximális értékét is meg lehet határozni, amit elhanyagolható légcseré esetén értünk:

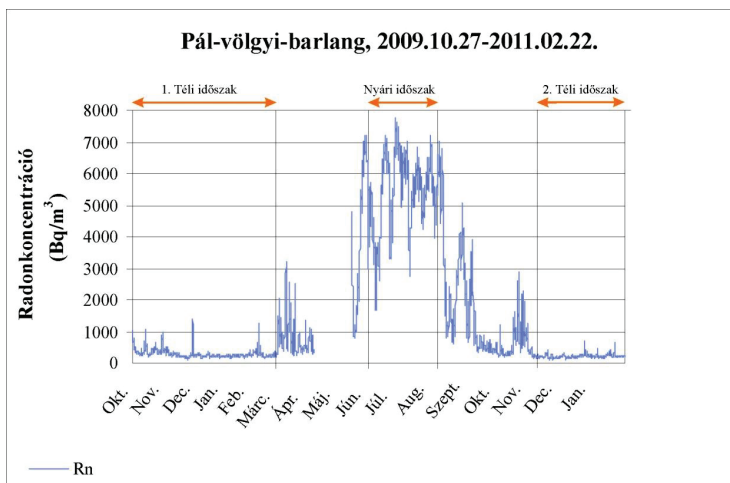
$$A_{\text{nyári}} = \frac{\bar{A}}{\bar{A}_{\text{téli}}}$$

Ekkor a nyári-téli radonkoncentráció arány segítségével a következőképpen fejezhetjük ki a légcseré relatív sebességét a téli időszakra:

A nyári radonaktivitás a fenti képletek miatt fordítottan arányos a radon bomlási állandójával. Minél nagyobb a lambda, annál kevesebbet tölt egy radon atom a levegőben, ezért annál kevesebbet járul hozzá a kialakult egyensúlyi koncentrációhoz. Ezért $\lambda \cdot A_{nyári}$ már nem függ attól, hogy mekkora felezési idejű izotóppal dolgozunk.

9.3.2. Pál-völgyi-barlang szellőzési foka

Perrier et al. (2004) módszere alapján a másfél éves mérést (Pál-völgyi-barlang) felosztottuk téli és nyári periódusokra, hogy azokból meghatározzuk a nyári-téli radonkoncentráció arányt, aminek segítségével kiszámolható az adott teremre jellemző szellőzési index, szellőzési gyorsaság.



62. ábra: A közel másfél éves radonkoncentráció monitorozás eredménye.

Az elkülönítés vizuálisan történt. A téli periódust úgy határoztam meg az adatok vizsgálata alapján, hogy a hosszabb időn keresztül fennálló alacsony radonkoncentráció értékek tartozzanak ide. Előfordult 1-2 nap, amikor az évszakra nem jellemzően, decemberben is 16 °C volt a külső hőmérséklet, de annak ellenére, hogy ezeken a napokon kifele húzó légáramlatot feltételeztem, ezeket az adatokat is benne hagytam. A nyári időszakot ugyanígy a hosszan tartó, nagy radonkoncentráció értékekhez rendeltem, amikor a feltevés szerint a levegő stabilan kifele áramlott (PERRIER et al, 2004). A cél a napi ingadozásokat mutató átmeneti időszakok (elsősorban tavasz, ősz) kizárása volt. A nyári időszakban előfordultak

átvonuló frontok, amelyek a stabil áramlást befolyásolják, ezért az időszak elejének és végének lehatárolása szubjektív döntés eredménye. Az ebből adódó kiértékelésbeli különbség a szisztematikus bizonytalansághoz tartozik.

A másfél éves mérés így két téli és egy nyári periódusra osztható. A pontos felosztás a 21. táblázatban látható, a 62. ábrán a narancssárga szakaszok jelölik (NAGY et al., 2012).

Periódus	Periódus kezdete	Periódus vége
1. téli	2009. 10. 27.	2010. 03. 18.
Nyári	2010. 06. 08.	2010. 08. 28.
2. téli	2010. 12. 03.	2011. 02. 22.

21. táblázat: A nyári és téli periódusok elkülönítése

Hasonló felosztást alkalmazott Perrier et al. (2004) is egy Párizs melletti földalatti mészkőbánya vizsgálata során, amelynek alapján a november 15-március 15. közti időszak a téli, a július 15-szeptember 15. közti időszak a nyári, a december 15-március 15. ismét téli periódus.

Időszak	Radonkoncentráció (Bq/m ³)				
	AM	GM	STD	min	max
1. téli	285	267	124	104	1408
Nyári	5504	5359	1139	1672	7776
2. téli	218	211	59	94	720

22. táblázat: A radonkoncentráció értékeinek változása a téli és nyári időszakokban.

Jelmagyarázat: AM-számtani közép, GM-mértani közép, STD-szórás.

A téli átlagos radonkoncentráció értékének meghatározásához a 22. táblázatban feltüntetett két téli periódusra jellemző radonkoncentrációk átlagát vettem.

Nyári-téli radonkoncentráció arány: —

Mészkőbarlangokban a nyári-téli radonkoncentráció arány értéke 1-10 között változik (SPERRIN et al., 2001; GILLMORE et al., 2002). A Pál-völgyi-barlangban ez az érték 21,8, ami azt jelenti, hogy a nyári és téli időszakra jellemző radonkoncentráció érték között az átlagosnál nagyobb a különbség, a radonkoncentráció értéke széles határok között változik.

$$\text{szellőzési index} = \lambda \cdot \left(\frac{A_{\text{nyári}}}{A_{\text{téli}}} - 1 \right)$$

Az ez alapján számolt szellőzési index értéke a Pál-völgyi-barlangban $4,38 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ (NAGY et al., 2012).

A $4,38 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ szellőzési index érték azt jelenti, hogy egy másodperc alatt a vizsgált terem térfogatának $4,38 \times 10^{-5}$ -ed részével azonos térfogatú levegő tud kicserélődni. A terem

térfogatának ismeretében megadhatnánk, hogy másodpercenként hány m^3 levegő cserélődik ki, azonban mivel a vizsgált terem több járat találkozásánál húzódik, a térfogatát nem tudjuk megbecsülni, nehéz eldönteni, hogy a járat mekkora részét számítjuk még a terem részének.

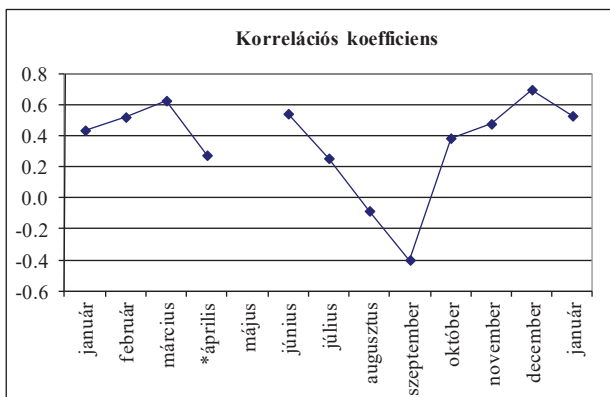
9.4. A korrelációs koefficiens szezonalitása

Az előző fejezetekből (9.1., 9.2., 9.3.) kiderült, hogy a radonkoncentráció és külső hőmérséklet egymással szoros kapcsolatban áll. A köztük lévő korrelációs koefficiens értékét az egész adatsorra nézve határoztuk meg. A radonkoncentráció és a külső hőmérséklet közötti korrelációs koefficiens értéke a Pál-völgyi-barlangban az egész adatsorra nézve 0,76. Hasonló eredményeket kapott Duenas a spanyolországi Nerja-barlangban végzett vizsgálatok során (DUENAS et al, 1999). A teljes mérési időszakra vonatkozó korrelációs koefficiens értéke ott is 0,7 és 0,75 volt két különböző teremben. GREGORIC (et al. 2011) és HWA & KIM (2011) ennél kisebb korrelációs koefficiens értékeket tapasztalt a radonkoncentráció és külső hőmérséklet között egy szlovéniai, illetve egy koreai mészkőbarlangban: $R=0,62$, illetve $R=0,6$.

január	0,4
február	0,5
március	0,6
április*	0,3
május	
június	0,5
július	0,3
augusztus	-0,1
szeptember	-0,4
október	0,4
november	0,5
december	0,7
január	0,5

23. táblázat: A radonkoncentráció (AlphaGuard) és a külső hőmérséklet közötti korrelációs koefficiens értékei a Pál-völgyi-barlangban a 2010-es év egyes hónapjaiban.

(*az áprilisi adatok részleges hiánya miatt a korrelációs koefficiens értéke a 2010. április 1-23 közötti időszakra vonatkozó adatokból lett kiszámolva. A májusi radonkoncentráció adatok szinte teljes hiánya miatt az együttható értékét erre az időszakra nem tudjuk megadni).



63. ábra: A radonkoncentráció és külső hőmérséklet közötti korrelációs koeficiens változásának szezonális periodicitása

A külső hőmérséklet hatása a barlangi radonkoncentrációra azonban nem ugyanolyan erősségű az egész év során, a korrelációs együttható értékében egy változás figyelhető meg (23. táblázat, 63. ábra). Értéke (óránkénti radonkoncentráció és hőmérséklet közötti korrelációs koeficiensnek havi átlagértékei) a július-szeptember időszakban a legkisebb (0,3;-0,4), szeptemberben és októberben ugyanakkora, azonban ellentétes előjelű, ami alapján augusztusban viszonylag gyenge, negatív hatással van a külső hőmérséklet a radonkoncentráció értékére, a legnagyobb korrelációs koeficiens értéket pedig decemberben tapasztaltuk. A radonkoncentráció és külső hőmérséklet közötti lineáris kapcsolat szezonális váltakozását DUENAS et al. (1999) is leírta, azonban a Nerja-barlang két különböző termében a korrelációs koeficiens értéke épp fordítva változott, míg tavasszal és nyáron 0,66; 0,73 volt az értéke, addig télen és ősszel 0,44; 0,47.

A spanyolországi Nerja-barlangot a víz eróziós hatása oldotta ki márványban. A márvány mészkőből és dolomitból képződő karbonátos kőzet. A Nerja-barlang az Almjara Complex dolomitmárványának szívében helyezkedik el (DUENAS et al., 1999). Főbejárata 158 méterrel a tengerszint felett található és kevesebb, mint 1km-re a partvonaltól. Összesen három bejárata van, ezek közül kettő természetes, egy mesterséges. A barlangban a radonkoncentrációt négy éven keresztül vizsgálták, hetente két mérést végeztek, amelynek időtartama 30 perc és 2 óra között változott, a méréshez módosított Lucas-cellát alkalmaztak (DUENAS et al., 1999).

Nerja település Afrikához való közelsége miatt kifejezetten kellemes klímával rendelkezik. A külső hőmérséklet télen sem csökken 15 °C alá, értéke nyáron 30 °C körüli értékeket mutat.

Duenas mérései alapján a barlang állandó hőmérséklete 20 °C, a külső hőmérséklet pedig jellemzően 16,8 °C az őszi-téli és 25,2 °C a tavaszi-nyári időszakban (DUENAS et al., 1999). A Pál-völgyi-barlang környezetében a terület eltérő klímája miatt, egészen máshogy alakulnak a külső hőmérséklet értékek. Az őszi-téli időszakban 5,5 °C, a tavaszi-nyári időszakban 16,1 °C az átlaghőmérséklet. Ez azt jelenti, hogy a külső levegő átlaghőmérséklete a Pál-völgyi-barlang környezetében a tavaszi és nyári periódusban vesz fel olyan értéket, mint a Nerja-barlang közelében az őszi és téli periódusban.

Ha a Pál-völgyi-barlang esetében a radonkoncentráció és külső hőmérséklet közötti korrelációs koeficiens értékeket átlagoljuk az őszi-téli és tavaszi-nyári időszakokra, hogy összehasonlítható legyen a Nerja-barlang korrelációs együtthatóival, a következő értékeket kapjuk:

$$R_{\text{őszi-téli}}: (R_{\text{jan}}+R_{\text{feb}}+R_{\text{szept}}+R_{\text{okt}}+R_{\text{nov}}+R_{\text{dec}})/6=0,35$$

$$R_{\text{tavaszi-nyári}}: (R_{\text{márc}}+R_{\text{ápr}}+R_{\text{jún}}+R_{\text{júl}}+R_{\text{aug}})/5=0,32$$

*a tavaszi-nyári időszakra átlagolt külső hőmérséklet és radonkoncentráció közötti korrelációs koeficiens érték az áprilisi adatokat részlegesen (április 1-23.), a májusi adatokat nem tartalmazza a radonkoncentráció adatok hiánya miatt.

Ebben az esetben sokkal kisebb a különbség a korrelációs koeficiens értéke között a két periódusban. A Nerja-barlang esetében $R_{\text{őszi-téli}}$: 0,44 illetve 0,47 volt, $R_{\text{tavaszi-nyári}}$: 0,66 és 0,73 két különböző teremben.

Mivel a Nerja-barlangra vonatkozóan nincsenek meg az egyes hónapokra jellemző korrelációs együttható értékek, a Pál-völgyi-barlang esetében pedig hiányoznak a májusi adatok, nehéz a korrelációs koeficiens szezonálisában megjelenő eltérések okát meghatározni, feltételezhetően azonban a két terület igen eltérő klímája okozza.

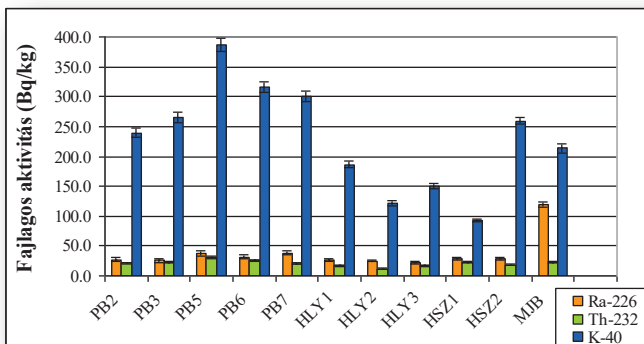
9.5. Barlangi agyag vizsgálata

A barlangban kialakuló radonkoncentráció értékét elsősorban az határozza meg, hogy „milyen erős” a rendelkezésre álló forrás (pl. kőzetek, üledékek), mekkora a rádiumtartalma, illetve, hogy a keletkezett radon gáz hány százaléka tud kijutni. Az ennek a két tényezőnek a függvényében kialakult radonkoncentráció értékét a 9.3.1. fejezetben bemutatott módon a radon bomlása és a szellőzés csökkentik. Elengedhetetlen tehát a barlangi agyagok, kőzetek, kőzetalkotók vizsgálata is, ha a radonkoncentrációt, főleg ha annak eredetét vizsgáljuk.

A doktori kutatás összesen négy budai-hegységi barlangot érintett. Részletes vizsgálatok történtek a Pál-völgyi-barlangban és a Molnár János-barlangban, ezen kívül kiegészítő vizsgálatokat végeztünk a Hideglyuk és a Harcsaszájú-barlangokban a barlangokból származó

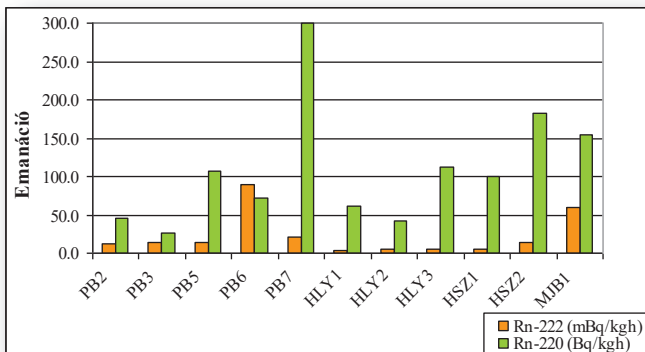
agyagmintákon. Az agyagos minták radioaktív izotóptartalma és radon, illetve toron kibocsátása alapján történő összehasonlítás során a Pál-völgyi-barlangból gyűjtött agyagminták esetében az agyag felszínéről vett minták eredményeit használtam fel.

Fajlagos ^{226}Ra aktivitásukat tekintve a barlangi agyagok egy 20 Bq/kg-os tartományon belül vannak (64. ábra), általában 20-40 Bq/kg között változik rádium aktivitásuk, ami a talajokra jellemző világtátlaggal egy nagyságrendbe eső érték (63. ábra, UNSCEAR, 2008). Egyetlen kivétel a Molnár János-barlangból származó agyagminta, amelynek fajlagos ^{226}Ra aktivitása 119 Bq/kg, ez azonban víz alól származó agyagminta. A minták ^{232}Th aktivitáshoz tartozó relatív szórása nagyobb, mint a rádium esetében láttuk, a fajlagos tórium aktivitás értékek között azonban nem találunk kiugró adatot, értéke 10-30 Bq/kg között változik (64. ábra). Legnagyobb különbség a minták ^{40}K aktivitásában látható (64. ábra), ugyanabból a barlangból származó agyagok esetében is jelentős eltérést tapasztaltunk. A fajlagos ^{40}K aktivitás értéke a Pál-völgyi-barlangból származó minták esetében a legnagyobb, 240-386 Bq/kg közötti értékeket mutat. A Hideglyukból, Harcsaszájú-barlangból és Molnár János-barlangból származó agyagok fajlagos ^{40}K aktivitásának értéke 93-260 Bq/kg. A különbségeket feltehetően a minták agyagásványtartalma (és ezzel összefüggésben káliumtartalma) okozza. DUENAS et al. (1999) a spanyolországi Nerja barlangból származó, az agyagos üledék felső 5 cm-es rétegéből gyűjtött minták ^{226}Ra , ^{232}Th és ^{40}K aktivitását vizsgálta gamma spektroszkópiával öt különböző teremből származó minta esetén. Az általa vizsgált agyagminták fajlagos ^{226}Ra aktivitása 45-67 Bq/kg között, ^{232}Th 1-32 Bq/kg között ^{40}K 18-489 Bq/kg közötti értékeket mutatott. Az általunk vizsgált minták kisebb rádium aktivitással rendelkeztek, a tórium- és káliumtartalmat tekintve pedig szűkebb tartományban mozognak, mint a Nerja barlangban gyűjtött minták, de azok értékeivel egy nagyságrendbe esnek. Hasonló eredményeket kapott CEVIK et al. (2011) két, törökországi barlangból származó agyag vizsgálata során. A Karaca nevű barlangból származó minták esetében a fajlagos ^{226}Ra aktivitás 20-84 Bq/kg között változott 43 Bq/kg-os átlagértékkel, a ^{232}Th aktivitás 3-30 Bq/kg volt, átlagértéke 19 Bq/kg, a ^{40}K aktivitása pedig 57-504 Bq/kg közötti értékeket mutatott 262 Bq/kg-os átlagértékkel. A törökországi Cal barlangban a fajlagos ^{40}K aktivitást leszámítva az értékek nem változtak ilyen tág határok között. Ra-226 aktivitás 26-38 Bq/kg 31 Bq/kg-os átlagértékkel, ^{232}Th aktivitás 20-34 Bq/kg 27 Bq/kg-os átlagértékkel, ^{40}K aktivitás pedig 196-648 Bq/kg között változott, átlagos értéke 460 Bq/kg volt. Az általunk vizsgált agyagminták eredményei ezekhez a mintákhoz állnak legközelebb.



64. ábra: A négy vizsgált (Pál-völgyi-barlang: PB2, PB3, PB5, PB6, PB7, Hideg-lyuk: HLY1, HLY2, HLY3, Harcsaszájú-barlang: HSZ1, HSZ2, Molnár János-barlang: MJB) különböző barlangból, származó összesen 11 agyagminta fajlagos ^{226}Ra , ^{232}Th és ^{40}K aktivitása.

A négy vizsgált budai-hegységi barlangból származó agyagminták radon és toron kibocsátás értékei sokkal változatosabb képet mutatnak, mint amire a minták fajlagos ^{226}Ra és ^{232}Th aktivitásából (65. ábra) következtetnénk. Ez is erősíti azt a tényt, hogy a radon kibocsátást számos tényező együttesen befolyásolja, az anyaelem jelenlétének mennyiségéből még nem következtethetünk a kibocsátás értékére. A legnagyobb értéket a Pál-völgyi-barlang Budai Márgába nyúló szakaszán gyűjtött agyag mutatta ezt követte a Molnár János-barlangból származó víz alatti agyagminta. Ez a két minta tehát a Budai Márga jelenlétéhez köthető. A márga nagyobb agyagtartalmának köszönhetően több kisebb átmérőjű szemcsével és így nagyobb fajlagos felülettel rendelkezik, ami kedvezően befolyásolja a radon kibocsátást. A Hideg-lyukból és Harcsaszájú-barlangból vett agyak rendelkeztek a legkisebb radon kibocsátással (65. ábra).



65. ábra: A négy vizsgált (Pál-völgyi-barlang: PB2, PB3, PB5, PB6, PB7, Hideg-lyuk: HLY1, HLY2, HLY3, Harcsaszájú-barlang: HSZ1, HSZ2, Molnár János-barlang: MJB) barlangból, származó összesen 11 agyagminta radon és toron kibocsátása.

A Pál-völgyi-barlangból származó minták esetében a fajlagos ^{226}Ra , ^{232}Th és ^{40}K aktivitás és radon, illetve toron kibocsátás értékek vizsgálata során nem találtunk különbséget a barlangi agyag felszínéről és a fúrásokból származó minták között, illetve a fúrásból származó agyagokban ezek a tulajdonságok a mélységgel nem mutattak összefüggést.

Különbséget mutattak azonban az agyagréteg felszínéről és a fúrás segítségével mélyebbről vett minták szemcseméret eloszlásukban. A felső rétegből származó minták egymáshoz képest hasonlóak, azonban a két, különböző ponton mélyített fúrásból gyűjtött agyagok szemcseméret eloszlása már eltérő, illetve az egy fúráson belüli egyes szintekben is nagy eltérések láthatók (32., 33., 34. ábra). Nem figyelhető meg továbbá egyértelmű összefüggés az egyes minták szemcseméret eloszlása és radon, illetve toron kibocsátása között. Ennek oka a kibocsátást befolyásoló egyéb tényezők (szemcseméret eloszlás, ^{226}Ra , ^{232}Th tartalom, porozitás, permeabilitás, stb.) együttes hatása (COTHERN & SMITH, 1987).

Az agyagok fajlagos ^{226}Ra , ^{232}Th és ^{40}K aktivitás, illetve radon és toron kibocsátás értékeihez képest az alapkőzet (mészkő és márga), illetve kőzetalkotó (kalcit) ezen értékei elhanyagolhatók. A kőzet tömörsége, kis porozitása, illetve a gamma-spektroszkópiai mérések során megfigyelt kis fajlagos ^{226}Ra aktivitás (11. táblázat) lehet felelős az alapkőzet csekély radon kibocsátásáért.

Ennek ellenére egyelőre még nem széles körben elfogadott az a nézet, hogy a radon szempontjából maga az alapkőzet a meghatározó, lévén a karszt egyik legfontosabb jellemzője a nagyfokú repedezettség, ami a barlangot körülvevő kőzetben nagy

felület/térfogat arányt hoz létre. Ezen keresztül lehetséges például a felszín és barlang közötti légcseré is. A tapasztalat szerint azonban a mészkő rádiumtartalma elenyészően csekély a barlangi üledék zömét képező agyagéhoz képest (KISS et al., 2004; DEZSŐ & MOLNÁR 2000; DEZSŐ et al., 2001).

VÁRHEGYI & SOMLAI (2006) vizsgálatai alapján a föld alatti bányák, barlangok felfoghatók extrém nagy talajpórusként. Átlagos rádiumtartalmat feltételezve, különböző nedvességtartalom esetén azonos talaj pórussterében $15\text{--}45 \text{ kBq/m}^3$ radonkoncentráció alakul ki modellszámítások alapján (pl. VÁRHEGYI & SOMLAI, 2006.) Ezt figyelembe véve, ha a Pál-völgyi-barlangot egy talajpórusnak tekintjük, az $1,8 \text{ kBq/m}^3$ évi átlagos radonkoncentráció egyáltalán nem számít kiemelkedő értéknek. Ezek alapján a barlangokban kialakuló radonkoncentráció elsődleges forrása egyértelműen a barlangi agyagos üledék rádiumtartalma (közvetve urántartalma) és radon kibocsátása lehet, ami átlagos talajokra jellemző értékeket mutat, a barlangok kis mértékű szellőzése mellett azonban elegendő kBq/m^3 nagyságrendű radonkoncentráció kialakulásához. A légtérben kialakuló radon aktivitáskoncentráció azonban több komplex hatás eredménye (befolyásoló tényezők az évszak, napszak, hőmérséklet, légnyomás, légcseré, stb.), amint azt többek között VÍGH (2011) is megállapította az úrkuti mangánbánya radiológiai vizsgálata során.

A barlangi agyagok ásványos összetételére elsősorban kvarc, kalcit, dolomit, vastartalmú ásványok (pl. framboidális kinézetű vastartalmú szemcsék) és agyagásványok (kaolinit, illit vagy muszkovit, szmektit) jellemzők (41., 42. 43. ábra).

Különbség figyelhető meg a mészkőből és márgából származó agyagminták között a pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálat alapján is. A Budai Márgába nyúló termékből (Pál-völgyi-barlang, 6. mintavételezési pont, Molnár János-barlang) (8., 9. ábra) vett agyagmintákból készült vékonycsiszolatokban sokkal nagyobb mennyiségben fordultak elő vas-oxid, vasoxi-hidroxid tartalmú szemcsék, illetve framboidális kinézetű szemcsék.

A pásztázó elektronmikroszkópos elemzés alapján a karbonátos alapkőzetek (mészkő és márga) savazás utáni oldási maradékából származó vizsgált szemcsék teljesen más képet mutattak, mint az agyagos üledékből szeparált szemcsék. Más a szemcsék megjelenése, textúrája/szöveve és összetétele is (38., 39., 40. ábra). Éles eltérést figyelhető meg a savazott mészkő és savazott márga között is, a márga oldási maradéka nagyobb hasonlóságot mutatott a barlangi agyagból szeparált szemcsékkel (megjelenése és vas-oxid, vasoxi-hidroxid tartalmú szemcsék előfordulási gyakorisága alapján) (40. ábra).

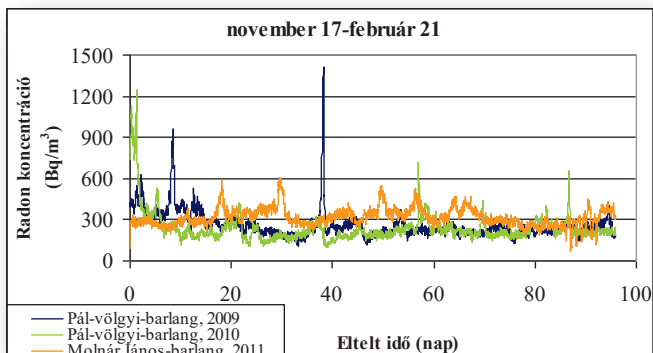
9.6. A Pál-völgyi és a Molnár János-barlang összehasonlítása a levegőjük radonkoncentrációja alapján

9.6.1. Aktív radon detektoros mérések

Folyamatos radonkoncentráció monitorozás történt egy órás időfelbontással a Pál-völgyi-barlangban 2009. október 27-2011. február 22. között, a Molnár János-barlangban pedig a 2011. szeptember 10-22., és a 2011. november 17-2012. február 21. közötti időszakokban. Mivel a szeptemberi és a novembertől-februárig tartó időszakra mindkét barlangból rendelkezünk adatokkal, lehetőség nyílik a két terem (Pál-völgyi-barlang 2-es mérési pont, Molnár János-barlang, Lukács-barlanggal szemben lévő mérési pont) összehasonlítására levegőjük radonkoncentrációja alapján.

Barlangi levegő radonkoncentrációjának összehasonlítása téli mérés eredményei alapján

A két barlang levegőjét összehasonlítva ugyanabban az időszakban a Molnár János-barlangban (Lukács-barlanggal szemközi terem) (9. ábra) a radonkoncentráció nagyobb értékeket mutatott. A téli vizsgálat alatt (november 17-február 21.) a radonkoncentráció átlagos értéke a Pál-völgyi-barlangban 2009-ben és 2010-ben 261, illetve 236 Bq/m³ volt, míg a Molnár János-barlangban 319 Bq/m³. Ha a Pál-völgyi-barlang 2009-es és 2010-es adatainak átlagát vesszük (248,5 Bq/m³) és megnézzük, hogy a Molnár János-barlangban ugyanebben az időszakban mért radonkoncentrációhoz képest (319 Bq/m³) hány százalékos a különbség ($\frac{319 - 248,5}{248,5} \cdot 100 \approx 28,4\%$), 25 %-ot kapunk végeredményül. A 65. ábra azt mutatja, hogy míg az átlagos radonkoncentráció értéke a Molnár János-barlangban valóban nagyobb, addig a Pál-völgyi-barlangban a levegő radontartalma sokkal nagyobb amplitúdójú változásokat mutat (a Molnár János-barlangban átlagosan maximum 300 Bq/m³-es változások figyelhetők meg, a Pál-völgyi-barlangban rövid idő alatt akár 400-1000 Bq/m³-t is változik a levegő radonkoncentrációjának értéke). A maximumok ugyanis a Pál-völgyi-barlangban vettek fel nagyobb értékeket mindkét évben és ennek köszönhetően itt a szórás értéke is nagyobb a vizsgált időszakban (24. táblázat).



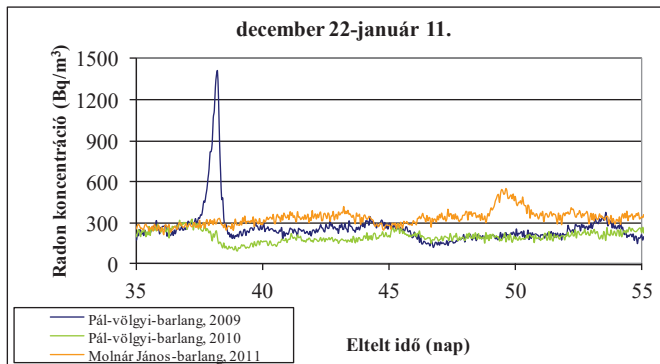
66. ábra: A radonkoncentráció értékének alakulása a Pál-völgyi-barlangban (2009, 2010) és a Molnár János-barlangban (2011) az évnek ugyanabban az időszakában (november 17-február 21)

11.17-02.21	Pv-b, 2009	Pv-b, 2010	MJ-b, 2011
adat	2302	2302	2302
átlag	261	236	319
medián	238	210	310
módusz	258	195	282
mértani közép	248	222	312
szórás	101	110	67
minimum	104	94	71
maximum	1408	1248	612

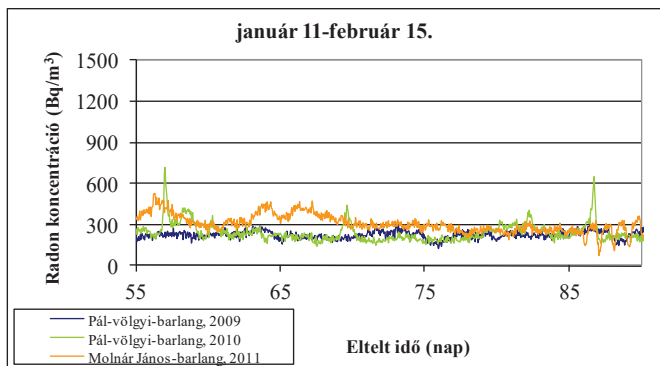
24. táblázat: A novembertől-februárig tartó mérések alapstatisztikai értékelése. A Pv-b jelölés a Pál-völgyi-barlangot, az MJ-b a Molnár János-barlangot jelöli.

A Pál-völgyi-barlang és Molnár János-barlang szellőzés-mechanizmusbeli különbségeire utal a 67. és 68. ábra is, amelyek a 66. ábra egy-egy szakaszát mutatják kinagyítva. Mindkét ábrán (67., 68. ábra) az látható, hogy a barlangi radonkoncentráció a téli időszakra jellemzően kis (pár száz Bq/m³) értékeket vesz fel, és a folyamatos behúzó légáramlatnak köszönhetően nem változik sokat, bizonyos hatások következtében (pl. évszakra jellemző hőmérsékletnél nagyobb hőmérséklet és emiatt a légmozgás irányának megfordulása) azonban megnő a radonkoncentráció értéke. A két barlang levegőjének radonkoncentrációja között a fő különbség ennek a növekedésnek a lejátszódása. A Pál-völgyi-barlang esetében sokkal keskenyebb és „hegyesebb” csúcsok figyelhetők meg (67. ábra 38. nap, 68. ábra 58., 69., 82., és 87. nap), a radonkoncentráció értéke gyorsabban változik, gyorsabban nő és csökken a

levegő radontartalma, míg a Molnár János-barlangban sokkal szélesebbek, elmosódottabbak a csúcsok; a barlangi levegőben a radon lassabban halmozódik fel, de lassabban is szellőzik ki. A november 17-től február 21-ig tartó időszakra azonban mindkét barlangra kis radonkoncentráció értékek jellemzők (a legkisebbek az évben) a barlangi radonkoncentráció szezonális váltakozásának következtében.



67. ábra: A radonkoncentráció értékének alakulása a Pál-völgyi-barlangban (2009, 2010) és a Molnár János-barlangban (2011) az évnek ugyanabban az időszakában (december 22-január 11.)



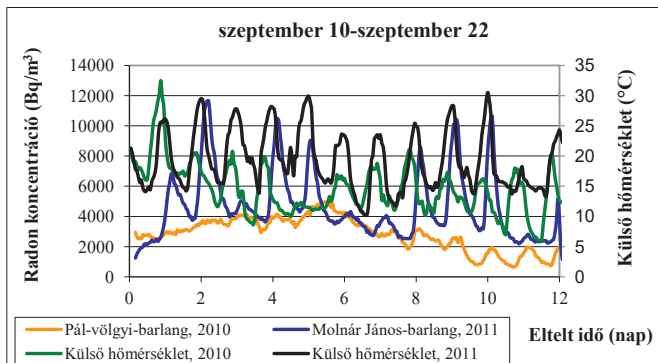
68. ábra: A radonkoncentráció értékének alakulása a Pál-völgyi-barlangban (2009, 2010) és a Molnár János-barlangban (2011) az évnek ugyanabban az időszakában (január 11-február 15.)

Barlangi levegő radonkoncentrációjának összehasonlítása az őszi mérés eredményei alapján

A két barlang levegőjének radonkoncentrációja közötti hasonlóságokat és különbségeket az őszi ~1,5 hetes mérés eredményei alapján is megvizsgáltam. A vizsgált időszakban a külső hőmérséklet 2010-ben 6-32 °C között változott, átlagos értéke 15 °C volt, 2011-ben 10-30 °C

között változott 19 °C-os átlagértékkel. A 69. ábrán látható, hogy a vizsgált időszakban 2010-ben csak egy-két nap fordult elő, amikor a külső hőmérséklet 10 °C alá esett, 2011-ben a külső hőmérséklet csak egy napon közelítette meg ezt az értéket. Ez azt jelenti, hogy a külső hőmérséklet a napok döntő többségében még nagyobb, mint a Pál-völgyi-barlang hőmérséklete, tehát a barlangban kihúzó légáramlat dominál. Kivétel a mérési periódus vége: az utolsó két napon a külső hőmérséklet éjszaka már 10 °C-nál kisebb értékeket is felvett, és hatására a radonkoncentráció értéke is csökkent 6000-ról 3000 Bq/m³-re. Napi maximumait azonban a külső hőmérséklet 20 °C körül éri el, ami a Molnár János-barlang levegőjének hőmérsékletéhez közeli érték. Ennek köszönhetően a Molnár János-barlangban már az átmeneti időszak tart. A külső hőmérséklet változásainak következtében tehát a szeptemberi mérés során már jóval nagyobb különbségek figyelhetők meg a két barlang levegőjének radonkoncentrációjában. Míg a Pál-völgyi-barlangban a radonkoncentráció értéke sokkal egyenletesebb, a Molnár János-barlang radonkoncentrációját a már említett napszakos periodicitás határozza meg (69. ábra). A 6. és 8. nap között a barlangi levegő radontartalma a két barlangban hasonló értékeket vett fel, a Molnár János-barlangban a levegő radonkoncentrációja az előző napokhoz képest kisebb volt. Az átlagos radonkoncentráció értéke a két barlangban nagy különbséget mutatott, míg a Pál-völgyi-barlangban értéke 2840 Bq/m³ volt, addig a Molnár János-barlangban 4626 Bq/m³. A radonkoncentráció által felvett szélső értékekben is nagy az eltérés. A maximum értéke a Molnár János-barlangban (11648 Bq/m³) több, mint kétszer nagyobb volt a radonkoncentráció maximális értékénél a Pál-völgyi-barlangban (5056 Bq/m³). Ebből kifolyólag a radonkoncentráció szórásának értéke a Molnár János-barlangban több, mint kétszerese volt a Pál-völgyi-barlangban mértnek (25. táblázat).

Ez a különbség tehát azzal magyarázható, hogy míg a Pál-völgyi-barlangban a vizsgálat idején még tartott a barlangi radonkoncentráció évszakos periodicitására jellemző nyári időszak (a külső hőmérséklet még nagyobb a barlangi levegő hőmérsékleténél), a Molnár János-barlangban már az őszi átmeneti időszak jellemző, mert a barlangi levegő hőmérséklete 20-21 °C, a külső levegő hőmérséklete pedig csak a napi maximumai során éri el ezt a hőmérsékletet, éjjel ennél kisebb értékeket vesz fel, a barlangi huzat iránya a külső hőmérséklet napszakos periodicitásával együtt változik.



69. ábra: A radonkoncentráció értékének alakulása a Pál-völgyi-barlangban (2010) és a Molnár János-barlangban (2011) az évnek ugyanabban az időszakában (szeptember 10-22)

09.10-09.22.	Pv-b, 2010	MJ-b, 2011
adatmennyiség	287	287
átlag	2840	4626
medián	2928	3984
mértani közép	2571	4170
szórás	1093	2237
minimum	628	1136
maximum	5056	11648

25. táblázat: A szeptemberi mérések alapstatisztikai értékelése.

A Pv-b jelölés a Pál-völgyi-barlangot, az MJ-b a Molnár János-barlangot jelöli.

Felvetődik a kérdés, mi okozza a két barlang levegőjében mérhető radonkoncentráció különbségét? A válasz kereséséhez több szempontot is figyelembe kell vennünk: 1) a Molnár János-barlangból származó agyagminta fajlagos ^{226}Ra aktivitása mutatta a legnagyobb értéket (119 Bq/kg) az összes barlangból származó agyagmintához képest. 2) a Molnár János-barlang vizsgált terme Budai Márgában húzódik.

A vizsgált Molnár János barlangi agyagminta radon kibocsátásánál egyetlen mintának volt nagyobb a radon kibocsátása, a Pál-völgyi-barlang Budai Márgába nyúló szakaszáról származó agyagmintának. A márga viszonylag nagy agyagtartalmának köszönhetően nagy fajlagos felülettel rendelkezik, ami kedvezően befolyásolja a radon kibocsátást. Ezt a feltételezést támasztja alá a radonkoncentráció térbeli eloszlásának vizsgálati eredménye (a Pál-völgyi-barlangban), amely alapján ugyanabban az időben a radonkoncentráció értéke a barlang Budai Márgába nyúló szakaszán közel kétszer olyan nagy volt, mint a Szépvölgyi Mészköben húzódó szakaszokon. Mivel a vizsgálat során a négy különböző helyszínen mért

radonkoncentráció egymással párhuzamosan változott, csak az értékükben volt különbség, a radonkoncentráció értékét az agyagos üledék radon kibocsátása határozza meg, a barlangi légmozgás a vizsgált termekben ugyanúgy hat. Hasonló eredmény látható KÖVÉR (2007).munkájában is, aki a Pál-völgyi-barlangban a Raktár és a Meseország nevű termekben vizsgálta párhuzamosan a levegő radonkoncentrációjának változásait.

A Pál-völgyi-barlang és Molnár János-barlang levegőjének radonkoncentrációja, az agyagminták radon kibocsátása és a radonkoncentráció térbeli eloszlásának (Pál-völgyi-barlang) vizsgálata alapján tehát nagy valószínűséggel a márgán keletkezett agyag a radon forrás.

9.6.2. Passzív radon detektoros mérés

A Pál-völgyi és Molnár János-barlang levegőjének radonkoncentrációját összehasonlítva a passzív nyomdetektoros mérések eredményei alapján a legfontosabb különbség a téli és nyári adatok értékei közötti eltérés. Míg a Pál-völgyi-barlangban a radonkoncentráció értéke a téli időszakban egyes termekben 100 Bq/m^3 alá is csökken, a Molnár János-barlangban a levegő radonkoncentrációja télen sem kisebb $\sim 800 \text{ Bq/m}^3$ -nél (26. táblázat). A Molnár János-barlangból nem rendelkezünk tavaszi eredményekkel, azonban a július-szeptemberi időszakra vonatkozóan a radonkoncentráció átlagértéke kisebb értékeket mutat ($2312\text{--}3856 \text{ Bq/m}^3$), mint a Pál-völgyi-barlangban ($1391\text{--}10587 \text{ Bq/m}^3$) azonos időszakban. Az aktív detektorral végzett mérések eredményei alapján azonban azt láttuk, hogy a Molnár János-barlang egy másik pontján (Szent Lukács-barlanggal szemben lévő terem) a radonkoncentráció értéke mindig nagyobb, mint a Pál-völgyi-barlangban.

Pál-völgyi-barlang	$C_{Rn} (\text{Bq/m}^3)$	Molnár János-barlang	$C_{Rn} (\text{Bq/m}^3)$
2010.11.23-2011.01.12.	170-332	2011.11.17-2011.12.8 2011.12.8-2011.01.12	1074-1299 839-982
2011.01.12-2011.02.22.	31-356	2011.01.12-2012.02.21	888-1104
2011.02.22-2011.03.22.	82-949		
2011.04.08-2011.05.24.	387-1425		
2011. 05.24-2011.07.21	1646-4450		
2011.07.21-2011.09.23	1391-10587	2011. 07.19-2011.09.09	2312-3856
2011.09.23-2011.11.15	737-3105	2011.09.09-2011.10.13. 2011.10.13-2011.11.17	82 945-1537

26. táblázat: A Pál-völgyi-barlangban és a Molnár János-barlangban végzett passzív nyomdetektoros mérések kb. 1,5 havi átlagos radonkoncentráció eredményei.

A Pál-völgyi-barlang adatai a mérési tartományt mutatják, amelyben a radonkoncentráció értéke az egyes mérési pontokon változott. Molnár János-barlang esetében a három különböző detektor által mért értékek tartományát jelöli.

9.7. Barlangi vizek oldott radontartalma

A Pál-völgyi-barlangba a kőzetek résein, repedésein keresztül a felszínről csapadékvíz szivárog be, ezzel szemben a Molnár János-barlangba a mélyből érkezik termálvíz. A megvizsgált vízminták eltérő jellegéből adódóan a minták oldott radontartalmában is különbség figyelhető meg. A Pál-völgyi-barlangból gyűjtött vízminták esetében a barlangi levegő radonkoncentrációjára jellemző szezonális váltakozás a csepegő vizek radonkoncentrációjában is megfigyelhető. Hasonló jelenséget a Molnár János-barlangot kitöltő víz esetén nem figyelhetünk meg.

Zárt rendszerben lévő víz és levegő között radon diffundál. Bizonyos idő eltelte után termikus egyensúlyban a két közeg radonkoncentráció aránya állandó lesz:

— , ahol:

C_v a víz radonkoncentrációja,

C_l a levegőben mért radonkoncentráció

A két rendszer közötti termikus egyensúly feltétele, hogy a hőmérséklet, nyomás és kémiai potenciál megegyezzen.

Szobahőmérsékleten az α egyensúlyi állandó értéke 0,25 (DEÁK, 1995). A barlang hőmérsékletén érvényes Henry-állandót nem ismerjük, de az egyensúlyi arány értéke barlangi körülmények között becsléseink szerint maximum néhány százalékkal tér el a szobahőmérsékleten érvényes aránytól. Egy erős felső becslésként (5 %-os eltérést feltételezve) az egyensúlyi arány a 0,23 - 0,27 tartományban van.

A 27. táblázatban látható, hogy a Pál-völgyi-barlang csepegő vizeiből gyűjtött minták radonkoncentrációi közötti arányok az egyes mintavételezési pontokon és időpontokban az egyensúlyi 0,25-ös aránytól eltérnek. Ezen arányok mindig nagyobbak az egyensúlyinál és értékük 0,4-8 tartományba esik. Ez azt jelenti, hogy a Pál-völgyi-barlangban a levegő és a csepegő vizek radontartalma egymással nincs egyensúlyban, az arány a víz irányába tolódik el, vagyis a víz nagyobb radonkoncentrációval rendelkezik, mint a levegő. Azonban mivel a barlangba beszivárgó vizek térfogata a levegő térfogatához képest elhanyagolható, a víz radonkoncentrációja a levegő radonkoncentrációját nem, vagy nem számottevően befolyásolja.

Kérdés azonban, hogy ha nem a levegőből oldódik be a radon a vizekbe, akkor mi a radon forrása a barlangi csepegő vizek esetében? Lehetséges források a felszíni talaj, a repedezett mészkő és a barlangi agyag lehetnek, a beszivárgás során a víz ezeken halad keresztül. A mészkövet, mint forrást az általunk végzett gamma-spektroszkópiai és radon kibocsátási

vizsgálatok alapján kizárhatjuk. A Pál-völgyi-barlang vizeinek radonkoncentrációja tehát vagy a talaj, vagy a barlangi agyag radonkibocsátásából származik. EISENLOHR és SURBECK szerint (1995) ha a beszivárgó víz permeabilis rétegeken keresztül érkezik (pl. negyedidőszaki homokkő), akkor a talaj a karsztvizek, vagy beszivárgó esővíz radontartalmának forrása. Az általuk vizsgált, Svájc nyugati részén a francia határ közelében eredő Areusa forrás vízgyűjtő területe azonban a Jura-hegységben található, ahol ismert a talaj nagy rádiumtartalma (SURBECK, 1992). A Pál-völgyi-barlang környezetéből gyűjtött talajminták radon kibocsátásának vizsgálata alapján (KÖVÉR, 2007) a Pál-völgyi-barlang esetében azonban a talaj maximum hozzájárulhat a barlangi agyag radon kibocsátásához, de nem lehet önállóan a barlangi levegő radonkoncentrációjának forrása. Ezért a Pál-völgyi-barlang esetében a beszivárgó vizek radontartalmának potenciális forrása a barlangi agyag.

		Víz (Bq/l)	Levegő (Bq/m ³)	Látszólagos egy. Áll.
2. pont	2011.02.22	0,95	263	3,61
	2011.04.08.	2,53	832	3,04
	2011.07.21.	6,94	2265	3,06
	2011.09.23.	5,86	1391	4,21
	2011.11.16.	2,22	2056	1,08
3. pont	2011.02.22	2,16	303	7,13
	2011.04.08.		1010	
	2011.07.21.	6,83	3096	2,21
	2011.09.23.	6,12	7763	0,79
	2011.11.16.	3,66	1762	2,08
5. pont	2011.02.22	0,8	348	2,30
	2011.04.08.	0,7	1102	0,64
	2011.07.21.	4,7	3374	1,39
	2011.09.23.	5,6	5724	0,98
	2011.11.16.	0,8	2251	0,36
7. pont	2011.02.22	8,2		
	2011.04.08.	10,9	1425	7,65
	2011.07.21.	21	3392	6,19
	2011.09.23.	11	10587	1,04
	2011.11.16.	1,7	2386	0,71

27. táblázat: Látszólagos egyensúlyi állandó értéke a Pál-völgyi-barlangból gyűjtött vízminták és a barlang levegőjének radonkoncentrációja között

10. ÖSSZEFOGLALÁS

Az elmúlt években számtalan közlemény jelent meg neves nemzetközi folyóiratokban, barlangok levegőjének radonkoncentrációjával kapcsolatban. Ezek a publikációk létjogosultságukat egyrészt a radon probléma egyre szélesebb körben való ismertségének köszönhetik, aminek következtében újabb és újabb területek, természeti objektumok és mélyépítések (mélygarázs, raktár, földalatti laboratórium) kerülnek a kutatások középpontjába, másrészt hozzájárulhatnak a barlangok jobb megismeréséhez.

Doktori kutatásom célja a barlangi levegő radonkoncentrációjának vizsgálata volt két szempont alapján: 1. a radonkoncentráció térbeli eloszlásának vizsgálata, 2. A radonkoncentráció másfél éves idősorában megfigyelhető évszakos és napi periodicitások leírása. Az értekezés ezen kívül a radonkoncentráció és külső levegőt jellemző meteorológiai paraméterek közötti korreláció vizsgálatára, illetve a barlangi radonkoncentráció földtani forrásának meghatározására fókuszált.

A bemutatott célok elérése érdekében a Budai-hegység két barlangjában, a Pál-völgyi és a Molnár János-barlangban történtek a barlangok természetes radioaktivitására irányuló vizsgálatok.

A levegő radonkoncentrációjának hosszú távú (másfél év) nagy időfelbontású (óránkénti mérés) monitorozása lehetőséget biztosított a barlangi levegő radonkoncentrációjában lejátszódó, rövidebb és hosszabb idejű változások megfigyelésére. Ennek köszönhetően sikerült a Pál-völgyi barlang levegőjének radonkoncentrációjában 12 órás, 24 órás és évszakos periodicitást kimutatni. Az időbeli változás mellett a levegő radonkoncentrációja térben sem állandó, a bejáratától való távolság növekedésével a radonkoncentráció értéke is nő. A távolság (tulajdonképpen szellőzés) mellett azonban a radonkoncentráció térbeli eloszlásában az alapkőzet típusa is szerepet játszik. A vizsgált barlangok az eocén nummuliteses Szépvölgyi Mészköben, magasabbra nyúló járataik pedig a bryozoás Budai Márgában húzódnak. A márga nagyobb agyagtartalommal rendelkezik, ennek köszönhetően fajlagos felülete is nagyobb. Ez az oka annak, hogy a márgán képződött agyagok radon kibocsátása nagyobb, mint a mészkövön képződött agyagoké, hiszen nagyobb felületen történik a radon kibocsátás. A kétfajta kőzet között nem csak radon kibocsátásukban figyelhető meg különbség. Az agyagokból készült vékonycsiszolatok pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálata alapján a márgán képződött agyagokban nagyobb mennyiségben fordulnak elő vas-oxidok, vasoxi-hidroxidok amelyek jó adszorpciós képességüknek köszönhetően felületükön rádiumot adszorbeálhatnak.

A két vizsgált barlang levegőjének radonkoncentrációja közötti különbség (a Molnár János-barlangban a Szent Lukács-barlanggal szemben lévő márgába nyúló fülkében a radonkoncentráció értéke legalább 25%-kal nagyobb, mint a Pál-völgyi-barlang 2. mérési pontján) oka is a mészkő és márga eltérő "radioaktivitása".

A vizsgálati eredmények rámutattak arra, hogy a barlangot kitöltő agyagos üledék rádiumtartalma átlagos talajra jellemző értéket mutat, a barlangokra jellemző csekély mértékű légcserének köszönhetően azonban ennek ellenére a barlangok levegőjében nagy mennyiségű radon halmozódik fel. Az így kialakuló radonkoncentráció értékét elsősorban a barlangi és külső hőmérséklet közötti különbség hatására kialakuló légmozgás iránya és nagysága határozza meg. A radonkoncentráció és a külső hőmérséklet közötti lineáris kapcsolat értéke nem állandó az év során, a korrelációs együttható nyáron kisebb, télen nagyobb. Mivel nyáron a külső hőmérséklet alig van hatással a barlangi levegő radonkoncentrációjára (a radonkoncentráció és külső hőmérséklet közötti korrelációs együttható értéke ekkor a legkisebb), a barlang bejáratán történő szellőzés ebben az időszakban elhanyagolható. Ezzel szemben télen fokozott légcserével számolhatunk. A Pál-völgyi-barlang 2. mérési/mintavételezési pontján a „terem” térfogatának $4,38 \times 10^5$ -ed részével azonos térfogatú levegő cserélődik ki másodpercenként a téli időszakban. Ez az érték gyors szellőzésre utal, aminek kimutatására a kis időfelbontású, passzív nyomdetektoros mérés nem lett volna alkalmas. Ezért is nagyon fontos a kitűzött cél eléréséhez megfelelő mérési módszer megválasztása.

A Pál-völgyi-barlang levegőjének évi átlagos radonkoncentrációja $\sim 1,9 \text{ kBq/m}^3$, téli minimum és nyári maximum értékekkel, azaz a horizontális barlangokra jellemző évszakos radonkoncentráció változással. Ez a szezonális változás a Molnár János-barlangban is megfigyelhető, azonban mivel a két barlang levegőjének állandó hőmérséklete eltérő, a külső hőmérséklet és barlangi hőmérséklet közötti különbség hatására kialakuló téli és nyári időszak ideje és hossza is másként alakul a Pál-völgyi és a Molnár János-barlangban.

Doktori kutatásom során meghatároztam a barlangi levegő radonkoncentrációjának forrását, a forrás mellett azokat a tényezőket, amelyek a barlangi levegő radonkoncentrációját befolyásolják (pl. szellőzés) és az így kialakult radonkoncentráció térbeli és időbeli változásait.

11. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

Az elmúlt három évben budai-hegységi barlangok, kiemelten a Pál-völgyi-barlang természetes radioaktivitását vizsgáltam. Eredményeim alapján a következő megállapításokat tettem:

(1). Megállapítottam, hogy a barlangi agyag fajlagos ^{226}Ra , ^{232}Th és ^{40}K aktivitása (^{226}Ra :~20-40 Bq/kg, ^{232}Th :~10-30 Bq/kg és ^{40}K :~100-400 Bq/kg), radon és toron kibocsátása, illetve a póruslevegő radonkoncentrációja alapján is átlagos talajokra jellemző értékeket mutat, azonban még ezzel együtt is jóval meghaladja az alapkőzetre (mészkő, márga) jellemző értékeket (^{226}Ra :~10 Bq/kg, ^{232}Th :~2-5 Bq/kg és ^{40}K :~10-35 Bq/kg). Ezek alapján a barlangi levegő radonkoncentrációjának forrásaként a barlangi agyagos üledéket határoztam meg, annak ^{226}Ra tartalma és radon kibocsátása alapján.

(2). Kimutattam, hogy különbség figyelhető meg a márgán és mészkövön képződött agyagok radon kibocsátása között, a márga erősebb radonkoncentráció forrás, a különbség a mérési hiba kétszerese (a mészkövön képződött agyagok radon kibocsátásának átlaga 15,5 mBq/kg, márgán képződött agyagé 90 mBq/kg). A barlangi radonkoncentráció értékének kialakulásában a márga radon kibocsátásának nagyobb hozzájárulását támasztja alá a Pál-völgyi-barlang és a Molnár János-barlang levegőjében mért radonkoncentráció különbsége, a Pál-völgyi-barlang Budai Márgába nyúló szakaszáról származó agyagminta radon kibocsátása, illetve a Pál-völgyi-barlangban a radonkoncentráció térbeli eloszlására irányuló vizsgálat eredménye. A különbség a márga más szemcseméret eloszlásával magyarázható, több benne a kisebb átmérőjű szemcse ezért nagyobb fajlagos felülettel rendelkezik így nagyobb felületen történik a radon kibocsátás.

(3). Megállapítottam, hogy a Pál-völgyi-barlangba beszivárgó csepegő vizek radonkoncentrációjában megfigyelhető egy évszakos periodicitás. A vizek oldott radontartalmára téli minimum és nyári maximum értékek jellemzők mind a négy mérési pont esetében. A vizek és a levegő radonkoncentrációja egymással nincsenek egyensúlyban. Az arányok mindig nagyobbak az egyensúlyinál (barlangi körülmények között ~0,23-0,27), értékük 0,4-8 tartományba esik. Ez azt jelenti, hogy a Pál-völgyi-barlangban a levegő és a csepegő vizek radontartalma egymással nincs egyensúlyban, az arány a víz irányába tolódik el, vagyis a víz nagyobb radonkoncentrációval rendelkezik. Azonban mivel a barlangba beszivárgó vizek térfogata a levegő térfogatához képest elhanyagolható, a víz

radonkoncentrációja a levegő radonkoncentrációját nem, vagy nem számottevően befolyásolja.

(4). Megerősítettem, hogy a barlangi radonkoncentráció időbeli változását befolyásoló legfontosabb tényező a külső hőmérséklet és meghatároztam a radonkoncentráció és külső hőmérséklet közötti Pearson-féle korrelációs együtthatót, amelynek értéke a 2009. 10. 27-2011. 02. 22. közötti időszakban a Pál-völgyi-barlang 2. mérési pontján 0,76 (R). Ez az érték megfelel a nemzetközi irodalomból ismert barlangi radonkoncentráció és külső hőmérséklet közötti korrelációs együtthatóknak ($R=0,6-0,75$).

(5). Megállapítottam, hogy a barlangi levegő radonkoncentrációja és a külső hőmérséklet közötti korreláció értéke nem konstans, a lineáris kapcsolat a két tényező között télen nagyobb, mint a nyári időszakban. Értéke (óránkénti radonkoncentráció és hőmérséklet közötti korrelációs együtthatók havi átlagértékei) a július-szeptember időszakban a legkisebb (0,3;-0,4), szeptemberben és októberben ugyanakkora, azonban ellentétes előjelű. A legnagyobb korrelációs együttható értéket (0,7) decemberben tapasztaltuk.

(6). Megerősítettem, hogy ha a külső hőmérséklet kisebb, mint a barlang állandó hőmérséklete, akkor a levegő kívülről befelé áramlik, ezért a barlangban kis radonkoncentráció alakul ki, fordított esetben a kihúzó légáramlat miatt a levegő a barlangból kifelé áramlik, friss levegő pedig csak a réseken, repedéseken keresztül érkezik, ezért a barlangi levegő radonkoncentrációja megnő. Kimutattam, hogy a barlangi és a külső hőmérséklet közötti különbség hatására kialakuló légmozgás (amely a barlangban a radonkoncentráció szezonális változásáért felelős) iránya a Pál-völgyi-barlangban 10-11 °C, a Molnár János-barlangban 21 °C-os külső hőmérsékletnél fordul meg. Ennek köszönhetően a Molnár János-barlangban a kihúzó légáramlat rövidebb ideig tart, mert a területre jellemző hőmérséklet ritkábban emelkedik 21 °C fölé, mint 10-11 °C fölé.

(7). Kimutattam, hogy a barlangi levegő radonkoncentrációjára az évszakos periodicitás mellett 24 órás (napszakos), és 12 órás változás is jellemző. A határozott napi periodicitás a külső hőmérséklet 24 órás periodicitásával függ össze. A 12 órás változás feltételezéseink szerint az árapály jelenséggel magyarázható. A szilárd kéreg árapálydeformációja a kőzetek és a kőzeteket kitöltő/borító agyagok radon kibocsátására is hatást gyakorol, ami így a barlangi levegő radonkoncentrációjának változásaiban is megfigyelhető és okozhat 12 órás változást.

KIVONAT

Évtizedek óta ismert, hogy föld alatti munkahelyeken, bányákban, barlangokban, barlangfürdőkben kiemelkedően nagy radonkoncentráció alakulhat ki (pl.: GILLMORE ET AL., 2000; PRZYLIBSKI, 1999; LARIO ET AL, 2006; JOVANOVIĆ, 1996; CSIGE, 2008; HAKL et al, 1997A; HAKL ET AL, 1997B; SOMLAI ET AL, 2011). Kutatási szemszögből ennek ellenére a barlangi radonra pozitív tényezőként is tekinthetünk. Mint mindenütt jelenlévő radioaktív nemesgáz, természetes nyomjelzőként vesz részt a légmozgások indikálásában (MOLNÁR & DEZSŐ, 2000; HAKL, 1997).

Doktori kutatásom célja a barlangi levegő radonkoncentrációjának vizsgálata volt két szempont alapján: 1. a radonkoncentráció térbeli eloszlásának vizsgálata, 2. A radonkoncentráció másfél éves idősorában megfigyelhető évszakos és napi periodicitások leírása. Az értekezés ezen kívül a radonkoncentráció és külső levegőt jellemző meteorológiai paraméterek közötti korreláció vizsgálatára, illetve a barlangi radonkoncentráció földtani forrásának meghatározására fókuszál.

A bemutatott célok elérése érdekében a Budai-hegység két barlangjában, a Pál-völgyi és a Molnár János-barlangban végeztem vizsgálatokat, de a kutatás elsősorban a Pál-völgyi-barlangra koncentrált. A levegő radonkoncentrációját itt másfél éven keresztül monitoroztam (egy ponton, aktív radon detektorral, egy órás időfelbontással). Párhuzamosan a meteorológiai paramétereket (hőmérséklet, légnyomás, páratartalom) két ponton (barlangon belül és kívül) vizsgáltam. Passzív radon detektort nyolc ponton helyeztem el és egy éven keresztül másfél havonta cseréltem a nyomdetektorokat. A Pál-völgyi-barlangból összesen 16 db szilárd mintát gyűjtöttem (agyag, kőzet/kőzetalkotó) amelyeknek ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K tartalmát, radon és toron kibocsátását határoztam meg. A 16 db minta közül 12-nek vizsgáltam a szemcsemért eloszlását, 6 darab mintából készült vékonycsiszolat, amiket pásztázó elektronmikroszkóppal vizsgáltam, 4 db agyagmintának pedig a röntgen pordiffrakciós elemzésére is sor került. A barlangba beszivárgó vizekből öt alkalommal, négy pontról összesen 19 db mintát vettem, amelyeknek folyadékszintillációs spektrometriával határoztam meg a radonkoncentrációját. A barlangi agyag pórusaiban lévő levegő radonkoncentrációját 4 ponton vizsgáltam.

A Molnár János-barlangban a levegő radonkoncentrációjának monitorozása három hónapon keresztül tartott, nyomdetektort egy ponton helyeztem el, amelyet átlagosan havonta cseréltem és összesen hét hónapon keresztül vizsgáltam vele a barlangi levegő radonkoncentrációját. Egy darab agyagminta ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K tartalmát határoztam meg gamma spektroszkópiával, illetve a radon és toron kibocsátását vizsgáltam. Az agyagmintából

vékonycsiszolatot készítettem, amin pásztázó elektronmikroszkópos elemzést végeztem. A barlangot kitöltő termálvíz radonkoncentrációját öt alkalommal vizsgáltam.

Az eredmények alapján a Pál-völgyi-barlangban a radonkoncentráció értéke $104\text{--}7776 \text{ Bq/m}^3$ között változott (2009. 10. 27-2011. 02. 22), egy évre vonatkozó átlagértéke (2009. 10.27-2010. 10. 27) $\sim 1,9 \text{ kBq/m}^3$. A Molnár János-barlangból nem rendelkezünk egész éves adatsorral, de azonos évszakban a radonkoncentráció értéke a Molnár János-barlangban mindig legalább 25%-kal nagyobb, mint a Pál-völgyi-barlangban. Mindkét barlang esetében megfigyelhető a levegő radonkoncentrációjában egy jellegzetes szezonális, a radonkoncentráció értéke a Pál-völgyi-barlangban télen 253 Bq/m^3 körül ingadozik, nyáron ennél nagyobb érték, 5504 Bq/m^3 a jellemző, tavasszal és ősszel pedig a téli és nyári időszakokra jellemző értékek között változik a radonkoncentráció. A meteorológiai paraméterek és a radon koncentráció közötti korreláció vizsgálata során azt tapasztaltuk, hogy a radonkoncentráció értékét döntően a külső hőmérséklet befolyásolja. A Pierson féle korrelációs együttható értéke a barlangi levegő radonkoncentrációja és a külső hőmérséklet között a Pál-völgyi-barlangban 0,76. Azonban a korreláció értéke nem konstans az egész év során; a korrelációs együttható értéke télen nagyobb, nyáron kisebb.

Ha - főleg ősszel és télen, - a külső hőmérséklet kisebb, mint a barlang állandó hőmérséklete (a Pál-völgyi-barlangban: $10\text{--}11 \text{ }^\circ\text{C}$, a Molnár János-barlangban: $20\text{--}21 \text{ }^\circ\text{C}$), a levegő a barlang széles bejáratán keresztül áramlik a barlangba. Azonban ha a külső levegő hőmérséklete nagyobb, mint a barlang állandó hőmérséklete (tavasszal és nyáron) a légáramlás iránya megfordul és a repedéseken, réseken keresztül érkező levegő radonnal telítődik, így a barlangban a levegő radonkoncentrációja megnő. Az évszakos periodicitás mellett gyakran napszakos váltakozás is megfigyelhető.

A barlangi agyag fajlagos ^{226}Ra , ^{232}Th és ^{40}K aktivitása, a radon és toron kibocsátása, illetve a póruslevegő radonkoncentrációja alapján a barlangi agyag átlagos talajokra jellemző értékeket mutat, azonban még ezzel együtt is jóval meghaladja az alapközetre (mészkö, márga) jellemző értékeket. Különbség figyelhető meg továbbá a márgán és mészkővön képződött agyagok között; a márga erősebb radonkoncentráció forrás, ezt támasztja alá a Pál-völgyi-barlang és a Molnár János-barlang levegőjében mért radonkoncentráció különbsége, a Pál-völgyi-barlang Budai Márgába nyúló szakaszáról származó agyagminta radon kibocsátása, illetve a radonkoncentráció térbeli eloszlására irányuló vizsgálat eredménye (Pál-völgyi-barlang).

ABSTRACT

Study of the dynamics and sources of the radon concentration in caves of Buda Hill

A long-term (one year and a half) radon concentration monitoring in Pál-völgy Cave (Budapest, Hungary) and a short term (three months) radon concentration monitoring in Molnár János Cave (Budapest, Hungary) was carried out with high resolution (with an integration time of one hour). Our major goal was to determine the time dependence of radon concentration in the caves and to understand the exchange pattern of the cave air with the outdoor air based on radon concentrations, to determine the factors that affect the radon concentration in the cave air, and to define the source of the radon concentration.

The radon concentration in the Pál-völgy Cave air was measured continuously by an AlphaGuard radon monitor and meteorological parameters outside the cave were also collected simultaneously. The arithmetic mean of the annual radon concentration was ~ 1.9 kBq/m³ and the radon concentration varied between 104-7,776 Bq/m³. In addition, the results indicate a clear seasonal variability of radon concentration in the cave air: in winter the radon concentration fluctuates around a low mean value of 253 Bq/m³, in summer it oscillates around a high mean value of 5,504 Bq/m³, whereas in spring and autumn the radon level varies between the winter and summer values. The summer to winter radon concentration ratio (radon concentration in summer/radon concentration in winter) was high, 21.8. The outside air temperature showed the strongest correlation with the radon concentration in the cave, Pierson's linear correlation coefficient is 0.76. However the value of the correlation coefficient is not constant for the whole year, it is higher in winter and lower in summer. If the outdoor air temperature is lower than the cave air temperature (10-11 °C), especially in autumn and winter, the air flows from outside into the cave and the radon concentration decreases in the cave. However, if the outdoor air temperature is higher than the cave air temperature the cave air stays where it is, thus, resulted in low rate ventilation. Besides the yearly cycle daily periodicity was found in the cave air radon concentration.

The radioactive isotope content of clayish cave sediments shows results typical of the average soil. Based on the results of the spatial distribution of radon concentration in the Pál-völgy cave, the radon emanation of the clayish cave sediment, collected from that section in Pál-völgy Cave which is situated in Buda Marl, and according to the difference between the radon concentration in Molnár János Cave and Pál-völgy Cave, the Buda Marl is stronger radon source than the Szépvölgy Limestone.

12. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A doktori disszertáció leghálásabb fejezete következik. Egyrészt mert a megírása jóval kellemesebb, hálásabb feladat, mint a többi fejezet megírása, másrészt mert tele vagyok hálával! **Témavezetőimnek** köszönöm, hogy évek óta szakmailag és emberileg is támogatják, segítik munkámat. Köszönöm, hogy elindítottak ezen az úton, hogy hasznos észrevételekkel, tanácsokkal láttak el, hogy amikor szükség volt rá hagyták, hogy a saját hibáimból tanulhassak. **Kiss Attilának**, a Pál-völgyi-barlang vezetőjének és legjobb ismerőjének köszönöm, hogy bevezetett ebbe a csodálatos föld alatti világba, hogy olyannyira megszerettette velem ezt a föld alatti üreget, hogy már most hiányzik és, hogy minden egyes mérésnél, műszer- vagy detektorcserénél elkísért és a segítségünkre volt. Szintén hálával tartozom **Leél-Össy Szabolcsnak**, aki egy másik varázslatos helyet ismertetett meg velem, a Molnár János barlangot és szintén nélkülözhetetlen volt a mérések, detektorcserék alkalmával. Köszönettel tartozom a házi védés előtti bírálóimnak, **Erőss Anitának** és **Homonnay Zoltánnak**, amiért átnézték dolgozatomat és hasznos észrevételeikkel, megjegyzéseikkel nagyban segítették munkámat. Köszönöm **Farkas Izabellának**, hogy időt és energiát áldozott rám és a mintáimra és lehetővé tette a röntgen-pordiffrakció mérések elvégzését az orientált mintákon. **Jordán Győzőnek** köszönöm az adatértékelésben nyújtott segítségét. **Csorba Ottó**nak és **Pávó Gyulának** nem tudok eléggé hálás lenni, egyrészt a gamma-spektroszkópiai méréshez szükséges tudás elsajátításában nyújtott segítségükért, másrészt az évek óta tartó kedvességükért, figyelmességükért, amely sokszor sokkal-sokkal többet adott, mint ahogyan azt valószínűleg ők hiszik. Köszönöm a Pannon Egyetem Radiokémiai és Radioökológiai Intézetének, elsősorban **Kovács Tibornak**, hogy a passzív detektorok biztosításával lehetővé tették számomra a nyomdetektoros mérést, **Csordás Anitának** pedig köszönöm a detektorok kiértekelését. **Leónak** köszönet a Hideglyukban és a Harcsaszájú-barlangban kihelyezett nyomdetektorokért és begyűjtött agyagmintákért. A barlangi kiszállások során nyújtott sokszor nélkülözhetetlen segítségéért és a csodálatosan szép fényképekért köszönet illeti **Ábelt**. **Anginak** köszönöm a rengeteg biztató mosolyt, a kedves szavakat, amelyektől a sokszor rideg-hideg labor falai egyből barátságosabbak, melegebbek lettek. Az **LRG régi és új tagjainak** köszönöm a közös munka támogató erejét, a sok-sok szakmai segítséget és a nem munkával töltött percekét. **Krisztinek** köszönöm, hogy a tudományos életbe való bekerülésre tett első kísérleteink (első konferenciák) során mindig motivált a kitartásával, elhivatottságával. **Zsuzsinak**, **Petinek** és **Katának** köszönöm az inspiráló közös munkát, a konzultációkat, szakmai beszélgetéseket. És a nem szakmaiakat is. **Mártinak** köszönöm a

bíztatást, a hasznos, gyakorlati jellegű tanácsokat és a sok-sok nevetést. **Andrisnak, Juditnak, Kornélnak, Krisztinek, Nominak, Szilvinek, Zsanettnak és Zsuzsinak** köszönöm, hogy vannak és, hogy pontosan olyanok amilyenek! **Családomnak** köszönöm, hogy van egy hely, ahova bármikor és mindig hazatérhetek! Köszönöm a biztatásukat, megértésüket és feltétlen szeretetüket!

A CEEPUS (Central European Exchange Program for University Studies) közép-európai Programnak köszönöm, hogy a **CEEPUS hallgatói mobilitási ösztöndíjnak** köszönhetően lehetőségem nyílt egy hónapot a Bécsi Egyetem Földtudományi Centrumában eltölteni és a doktori disszertációmát befejezni. **Szabó Csabának** és bécsi mentoromnak, **Friedrich Kollernek** nagyon-nagyon köszönöm, hogy támogatták pályázatomat! Köszönöm a **Környezettudományi Doktori Iskolának** és a **Magyar Fejlesztési Bank Habilitas ösztöndíjának**, hogy biztosították részvételemet számos hazai és nemzetközi konferencián.

És kissé furcsa, de szeretnék „köszönetet mondani” a természetnek is. Az elmúlt három évben, akárhányszor jártam a Pál-völgyi- vagy a Molnár János-barlangban, mindig azt éreztem, hogy én vagyok a világ legszerencsésebb embere, hogy ilyen lélegzetelállító helyeken végezhetem a doktori kutatásaimat, és hogy ez tényleg egy ajándék. A természetnek ez a szépsége, nyugalma, csendje mindig új erővel töltött fel!

Zárszónak pedig álljon itt az amerikai barlangkutatók hármasszabálya „Ne vigyél mást, csak emlékképeket; ne csapjál agyon mást, mint az idődet; ne hagyjál hátra mást, csak a lábnyomaidat.”

13. IRODALOMJEGYZÉK

- ABUMURAD, K. M., AL-OMARI, R. A. (2008): Indoor radon levels in Irbid and health risk from internal doses, *Radiation Measurements* 43, S389–S391
- ALBERGI, S., PECEQUILO, B. R. S., CAMPOS, M. P. (2005): Radon concentrations in caves of Parque Estadual do Alto Ribeira (PETAR), SP, Brazil: preliminary results. *International Congress Series*, 1276, pp. 403–404
- AL-MUSTAFA, H., AL-JARALLAH, M. I., FAZAL-UR-REHMAN, ABU-JARAD, F. (2005): Radon concentration measurements in the desert caves of Saudi Arabia. *Radiation Measurements*, 40, pp. 707 – 710
- BÁLDI, T. (1983): Magyarországi oligocén és alsómiocén formációk. Akadémiai Kiadó, Budapest, p. 293
- BALOGH K., CSIGE I., HAKL J., HERTELENDI E., HUNYADI I., KOLTAY E., KOVÁCH Á., RAJTA I. (1994): Fejezetek a környezetfizikából, Kézirat KLTE-ATOMKI Közös Fizikai Tanszék, Debrecen
- BÁNYÁSZ, GY. & MÓCSY, I. (2005): A radon in Radon a Kárpát-medencében, szerk. Dr. Mócsy I. & Dr. Néda Tamás, Kolozsvár (Református Egyház Misztótfalusi Kis Miklós Sajtóközpontjának nyomdája) p. 185
- BEZSENYI, A. (2006): A radontartalom és lehetséges forrásainak összehasonlítása magyarországi karsztosodó kőzetben képződött korróziós és eróziós barlangokban, szakdolgozat, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Természettudományi Kar, Atomfizikai Tanszék, p. 103
- BÖGLI, A. (1964): Mischungskorrosion, ein Beitrag zur Verkarstungsproblem: *Erdkunde*, v. 18, 83-92. p
- BROOKS, A. L., RITHIDECH, K., KITCHIN, R. M., JOHNSON, N. F., THOMASSEN, D. G., NEWTON, G. J. (1992): Evaluating chromosome damage to estimate dose to tracheal epithelial cells, in Cross, F. T. (Ed), *Proceedings of the 29th Hanford Symposium on Health and the Environment-Indoor Radon and Lung Cancer: Reality or Myth? Part 2*, Battelle Press, Columbus, OH, pp. 601-614
- CELIK, N., CEVIK, U., CELIK, A., KUCUKOMEROGLU, B. (2008): Determination of indoor radon and soil radioactivity levels in Giresun, Turkey, *Journal of Environmental Radioactivity* 99 , 1349–1354
- CEVIK, U., KARA, A., CELIK, N., KARABIDAK, M., CELIK, A. (2011): Radon Survey and Exposure Assessment in Karaca and Çal Caves, Turkey *Water Air Soil Pollut*, 214, 461–469
- CHAU, N. D., CHRUSCIEL, E., PROKOLSKI, L. (2005): Factors controlling measurements of radon mass exhalation rate, *Journal of Environmental Radioactivity*, 82, 363-369
- CHAUHAN, R. P., M., NAIN, KANT, K. (2008): Radon diffusion studies through some building materials: Effect of grain size, *Radiation Measurements*, 43, S445-S448

COTHERN, C. R., JR. SMITH, J., E. (1987): Environmental Radon, Environmental Science Research, Plenum Press, New York and London

CSIGE, I. (2008): Radon a természetes és az épített környezetben, Habilitációs disszertáció, Debreceni Egyetem, p. 81

DARBY, S., HILL, D., AUVINEN, A., BARRIOS-DIOS, J. M., BAYSSON, H., BOCHICCHIO, F., DEO, H., FALK, R., FORASTIERE, F., HAKAMA, M., HEID, I., KREIENBROCK, L., KREUZER, M., LAGARDE, F., MAKELAINEN, I., MUIRHEAD, C., OBERAIGNER, W., PERSHAGEN, G., RUANO-RAVINA, A., RUOSTEENOJA, E., ROSARIO, A. S., TIRMARCHE, M., TOMASEK, L., WHITLEY, E., WICHMANN, H. E., DOLL, R. (2005): Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies, *British Medical Journal*, 330, 223-226.

DEÁK, N. (1995): Természetes radioaktivitás mérése vízben, szakdolgozat, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Természettudományi Kar, Atomfizikai Tanszék

DENMAN, A. R., CROCKETT, R. G. M., GROVES-KIRKBY, C. J., PHILLIPS, P. S., GILLMORE, G. K., WOOLRIDGE, A. C. (2007): The value of seasonal correction factors in assessing the health risk from domestic radon-A case study in Northamptonshire, UK, *Environmental International*, 33, 34-44

DEZSŐ, Z., HAKL, J., MOLNÁR, L. (2001): Barlangi kőzetek radon exhalációja, *Karsztfejlődés VI. Szombathely*, pp. 305-313

DEZSŐ, Z., MOLNÁR, L., (2000): Barlangkutatás radonnal, Barlangkutatók Szakmai Találkozója, Pécs, 2000. Október 27-29

DUEÑAS, C., FERNANDEZ, M., C., CANETE, S., CARRETERO, J., LIGER, E. (1999): ²²²Rn concentrations, natural flow rate and the radiation exposure levels in the Nerja Cave, *Atmospheric Environment*, 33, 501-510

EBAID, Y. Y., EL-MONGY, S. A., ALLAM, K. A. (2005): *Int. Congr. Ser.* 1276, 409-411

EISENLOHR, L., SURBECK, H. (1995): Radon as a natural tracer to study transport processes in a karst system. An example in the Swiss Jura, *C.R. Acad. Sci. Paris*, 321, 761-767

ERŐSS, A., MÁDL-SZŐNYI, J., CSOMA, É. A., (2008): Characteristics of discharge at Rose and Gellért Hills, Budapest, Hungary. *Cent. Eur. Geol.* 51, 267-281.

ERŐSS, A., MÁDL-SZŐNYI, J., SURBECK, H., HORVÁTH, Á., GOLDSCHIEDER, N., CSOMA, A. É. (2012): Radionuclides as natural tracers for the characterization of fluids in regional discharge areas, Buda Thermal Karst, Hungary, *Journal of Hydrology* 426-427, 124-137

ESPINOSA, G., GOLZARRI, J. I., GAMMAGE, R. B., SAJO-BOHUS, L., VICCON-PALED, J., SIGNORET-POILLOND, M. (2008): *Radiation Measurements*, 43, pp. 364-368

EVANS, H. H. (1991): Cellular and molecular effects of radon and other alpha particle emitters, *Adv. Mutagen. Res.*, 3, 28-52

FLEISCHER, R.L. and MOGRO-CAMPERO, A. (1978): Mapping of integrated radon emanation for detection of long-distance migration of gases within the earth, *Techniques and principles*, J. Geophysics Res. Vol.83. pp.3539-3549

FRANCO-MARINA, F., VILLALBA-CALOCA, J., SEGOVIA, N., TAVERA, L. (2003): Spatial indoor radon distribution in Mexico City, *The Science of the Total Environment*, 317, 91–103

GERVINO, G., BARCA, D., BRUNO, S., BONETTI, R., MANZONI, A. (2007): Annual average and seasonal variations of indoor radon concentrations in Piedmont (Italy) using three different detection techniques, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, A 572, 254–256

GILLMORE, G. K., SPERRIN, M., PHILLIPS, P., DENMAN, A. (2000): Radon Hazards, Geology, and Exposure of Cave Users: A Case Study and Some Theoretical Perspectives, *Ecotoxicology and Environmental Safety* 46, 279-288

GILLMORE, G. K., PHILLIPS, P. S., DENMAN, A. R., GILBERTSON, D. D. (2002): Radon in the Creswell Crags Permian limestone caves, *Journal of Environmental Radioactivity* 62, 165–179

GILLMORE, G. K., PHILLIPS, P. S., DENMAN, A. R. (2005): The effects of geology and the impact of seasonal correction factors on indoor radon levels: a case study approach, *Journal of Environmental Radioactivity*, 84, 469-479

GOLDSTEIN, J.I. (1992): *Scanning Electron Microscopy and Microanalysis*. 2nd Edition - Plenum Press, New York, London

GORJÁNÁČZ, Z. (2006): Az uránbányászat utólagos hatásai a nyílt és zárt terek radonkoncentrációjára, beavatkozási lehetőségek, doktori értekezés, Pannon Egyetem, Radiokémiai Tanszék, p. 120

GREGORIC, A., ZIDANSEK, A., VAUPOTIC, J. (2011): Dependence of radon levels in Postojna Cave on outside air temperature, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 11, 1523–1528

GROVES-KIRKBY, C. J., DENMAN, A. R., CROCKETT, R. G. M., PHILLIPS, P. S., GILLMORE, G. K. (2006): Identification of tidal and climatic influences within domestic radon time-series from Northamptonshire, UK, *Science of the Total Environment*, 367, 191-202

GYALOG, L. (2005): Magyarország fedett földtani térképe 1:100 000, Magyar Állami Földtani Intézet, ISBN 963 671 251 4

HAAS, J. (1994): Magyarország földtana, Mezozoikum, egyetemi jegyzet, Eötvös Loránd Tudományegyetem Természettudományi kar, p. 118

HAKL, J. (1997): Application of Radon-222, as a Natural Tracer in Environmental Studies, Ph.D. thesis, Kossuth Lajos Egyetem, Debrecen, p. 34

HAKL, J. HUNYADI, I., VÁRHEGYI, A. (1997a): Radon monitoring in caves. In: Radon measurements by etched track detectors. - Applications in Radiation Protection, Earth Sciences and the Environment. Eds: S.A. Durrani, R. Ilic, World Scientific Publishing Co., Singapore, pp. 261-283.

- HAKL, J., HUNYADI, I., CSIGE, I., GÉCZY, G., LÉNÁRT, L., VÁRHEGYI, A. (1997b): Radon transport phenomena studied in karst caves – International experiences on radon levels and exposures, *Radiation Measurements*, 28, 675-684
- HANTKEN, M. (1866): A kiscelli tályag kora, *Magyar orvosok és Term. Vizsg Vándorgyűl. Munk.* 9. 234-237
- HANTKEN, M. (1868): A kiscelli tályag foraminiferái, *Magyar Földtani Társ. Munk.* 4. 75-122
- HUNYADI, I., CSIGE, I., GÉCZY, G. & HAKL, J. (1995): Radon doses received in speleotherapy courses in Hungary, *Radiation Measurements*, 25, 655-656.
- HWA, O. & KIM, G. (2011): Factors controlling the air ventilation of a limestone cave revealed by ^{222}Rn and ^{220}Rn tracers, *Geosciences journal*, Volume 15, Number 1, pp. 1-120
- ICRP (1966): Task Group on Lung Dynamics, Deposition and retention models for internal dosimetry of the human respiratory tract, *Health Physics*, 12, pp. 173-20
- ICRP (1987): No. 50. Lung cancer risk from indoor exposures to radon progeny. Pergamon Press, Oxford, New York
- ICRP (1991): No. 60. Recommendations of the International Commission on Radiation Protection, Pergamon Press, Oxford, New York
- ICRP (1993): Publication 65, Protection against radon-222 at home and at work, *Annals of the ICRP*, Vol. 23, No. 2, 1993, Published for the International Commission on Radiological Protection by PERGAMON
- JAMES, A. C. (1988): Lung Dosimetry, In: Nazaroff, W.W. and Nero, A.V. Jr. (1988): Radon and its decay products in indoor air, John Wiley & Sons, New York, p. 518
- JOSTES, R. F. (1996): Genetic, cytogenetic, and carcinogenic effects of radon: a review. *Mutation research*, 340, 125-139
- JOVANOVIĆ, P. (1996): Radon measurements in karst caves in Slovenia, *Environment International*, 22(1), S429-S432
- KALINOVITS, S. (2000): Molnár János-barlang in Dr. Korpás László Milleniumi Barlangnap Budapest, a barlangok fővárosa, Magyar Karszt- és Barlangkutató Társulat a Milleniumi Kormánybiztosítási Hivatal támogatásával 65
- KARPINSKA, M., MNICH, Z., KAPALA, J. (2004): Seasonal changes in radon concentrations in buildings in the region of northeastern Poland, *Journal of Environmental Radioactivity* 77, 101-109
- KÁVÁSI, N. (2006): Az évi átlagos radonkoncentráció és a sugárterhelés meghatározása különböző munkaterületeken, doktori disszertáció, Radiokémiai Tanszék, Pannon Egyetem, Veszprém, p. 114

- KÁVÁSI, N., SOMLAI, J., SZEILER, G., SZABÓ, B., SCHAFER, I., KOVÁCS, T. (2010): Estimation of effective doses to cavers based on radon measurements carried out in seven caves of the Bakony Mountains in Hungary, *Radiation Measurements* 45, 1068-1071
- KHAN, H. A., QURESHI, A. A., QURESHI I. E. (1997): Radon and mineral exploration: A supplementary review. In *Radon measurements by etched track detectors* (eds. S.A. Durrani and R. Ilic) *Applications in Radiation Protection, Earth Sciences and the Environment*, 319-343.
- KHAN, M. S., NAQVI, A. H., AZAM, A. (2008): Study of indoor radon and its progeny levels in rural areas of North India using LR-115 plastic track detectors, *Radiation Measurements* 43, S385–S388
- KIES, A., MASSEN, F., FEIDER, M. (1997): Measuring Radon in underground locations. In: Virk, H.S. (Ed.), *Rare Gas Geochemistry*. Guru Nanak Dev University, Amritsar, pp. 1–8.
- KISS, Á. (2005): Környezetfizikai laboratóriumi gyakorlatok, Eötvös Kiadó
- KISS, Á. Z., SZÁNTÓ, ZS., DEZSŐ, Z. (2004): Az ATOMKI szerepe a környezetvédelemben. *Fizikai Szemle*, 5, pp. 155
- KORDOS, L., JAKUCS, L., GÁDOROS, M., TARDY, J. (1984): Magyarország barlangjai, Gondolat Kiadó, Budapest, p. 326
- KORPÁS, L. (2000): A Budai-hegység karsztrendszere in Dr. Korpás László Milleniumi Barlangnap Budapest, a barlangok fővárosa, Magyar Karszt- és Barlangkutató Társulat a Milleniumi Kormánybiztosítási Hivatal támogatásával, 65
- KÖTELES, GY. (1994): Radon a környezetünkben, *Fizikai szemle*, 6
- KÖTELES, J. GY. (2007): Radon risk in spas?, *Central European Journal of Occupational and environmental medicine*, 13, 3-16
- KÖVÉR, A. (2007): A barlangi radon-koncentráció viselkedésének vizsgálata a Pál-völgyi-barlangban, szakdolgozat, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Természettudományi Kar, Atomfizikai Tanszék, p. 90
- KRAUS, S. (1999): Barlangökológia, 1. rész, Alapfokú ismeretek, Magyar Karszt- és Barlangkutató Társulat, Budapest, p. 76
- KRISHNASWAMI, S., COCHRAN, J. K., (2008): Appendix B: Systematics of Radioactive Decay in: Baxter, M.S. *Radioactivity in the environment* (Volume 13.), A companion series to the *Journal of Environmental Radioactivity*, Elsevier. 425-431
- KUMAR, R., SENGUPTA, D., PRASAD, J. (2003): Natural radioactivity and radon exhalation studies of rock samples from Surda Copper deposits in Singhbhum shear zone, *Radiation Measurements*, 36, 551-553

- LARIO, J., SÁNCHEZ-MORAL, S., CANAVERAS, J. C., CUEZVA, S., SOLER, V. (2005): Radon continuous monitoring in Altamira Cave (northern Spain) to assess user's annual effective dose. *Journal of Environmental Radioactivity*, 80, pp. 161–174
- LARIO, J., SÁNCHEZ-MORAL, S., CUEZVA, S., TABORDA, M., SOLER, V. (2006): High ^{222}Rn levels in a show cave (Castanar de Ibor, Spain): Proposal and application of management measures to minimize the effects on guides and visitors, *Atmospheric Environment*, 40, 7395–7400
- LEÉL-ÖSSY, SZ. (1995): A budai Rózsadomb és környékének különleges barlangjai, *Földtani Közlöny*, 125/3-4, 363-432
- LEÉL-ÖSSY, SZ., ADAMKÓ, P., KALINOVITS, S. (2008): Víz- és földalatti csodavilág: a budapesti Molnár János barlang.- *Környezetvédelem*, XVI/6, 30-31.
- LEÉL-ÖSSY, SZ., BERGMANN, CS., BOGNÁR, CS. (2011): A budapesti Molnár János-barlang termálvizének veszélyeztetettsége, *A Miskolci Egyetem Közleménye, A sorozat, Bányászat*, 81. kötet
- LEÉL-ÖSSY, SZ., SURÁNYI, G. (2003): Peculiar hydrothermal caves in Budapest, Hungary. – *Acta Geologica Hungarica*, 46/4, pp. 407–436
- MARLEY, F. (2001): Investigation of the influences of atmospheric conditions on the variability of radon and radon progeny in buildings, *Atmospheric Environment* 35, 5347–5360
- MAUCHA, L. (1967): Karsztos szivornyák, mint hidraulikai jelfogók. -Karszt és Barlang. I.-II. Budapest. p. 11-16
- MAUCHA, L. (1973): A Vass Imre-barlangi litoklázis fluktuáció mérés újabb eredményei (Összefoglalás), *Karszt- és Barlangkutatási Tájékoztató, A Magyar Karszt- és Barlangkutató Társulat Kiadványa*, 9-11
- MINDA, M. (2009): A lakótéri radonszintet befolyásoló paraméterek meghatározása, doktori disszertáció, *Kémiai és Környezettudományok Doktori Iskola, Radiokémia Tanszék, Pannon Egyetem, Veszprém*, p. 143
- MOLNÁR, L., DEZSŐ, Z. (2000): Barlangi terek kutatása radon segítségével. *Karsztfejlődés V, Szombathely*, pp. 283-291
- NAGY H. É., BREITNER D., HORVÁTH Á. & SZABÓ CS. (2011): Study of a passive radon mitigation process and indoor radon concentration's time dependence after mitigation, *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*, 6/2, 143-149
- NAGY, H.É., SZABÓ, Zs., JORDÁN, GY., SZABÓ, CS., HORVÁTH, Á. & KISS, A. (2012) Time variations of ^{222}Rn concentration and air exchange rates in a Hungarian cave. *Isotopes in Environmental and Health Studies*, DOI: 10.1080/10256016.2012.667809.
- NAGYMAROSY, A., BÁLDI, T., HORVÁTH, M. (1986): The Eocene-Oligocene boundary in Hungary. – In: Pomerol, C., I. Premoli-Silva (Eds): *Terminal Eocene Events*. Elsevier, Amsterdam, 113–116.

- NAZAROFF, W. W., FEUSTEL, H., NERO, A. V., REVZAN, K.L., GRIMSRUD, MDT., ESSLING, A. (1985): Radon transport into a detached one-story house with a basement, *Atmospheric Environment*, 19, 31–46.
- NAZAROFF, W. W., NERO, A. V. JR. (1988): Radon and its decay products in indoor air. – John Wiley&Sons, New York, 518.
- NYERGES, M. (1995): Barlangklimatológiai alapismeretek in Németh T., Rose Gy. (eds) A barlangjárás alapjai, Virág Tibor Egyéni Kereskedelmi és Szolgáltató Iroda, Budapest
- PAPASTEFANOU, C., MANOLOPOULOU, M., STOULOS, S., IOANNIDOU, A., GERASOPOULOS, E. (2005): *International Congress Series*, 1276, pp. 204–205
- PERRIER, F., RICHON, P., CROUZEIX, C., MORAT, P., MOUEL, J-L. (2004): Radon-222 signatures of natural ventilation regimes in an underground quarry, *Journal of Environmental Radioactivity*, 71, 17-32
- PLÓZER, I. (1974): A magyarországi bűvár-barlangkutatás története és bibliográfiája Karszt és Barlang, 1974, II. P. 61
- PORSTENDÖRFER, J. (1994): Properties and behavior of radon and thoron and their decay products in the air, *J. Aerosol Sci*, 25, 209-263
- PRZYLIBSKI, T. A. (1999): Radon concentration changes in the air of two caves in Poland, *Journal of Environmental Radioactivity*, 45, 81-94
- SCHRÉTER, Z. (1909): A budai-hegyek legrégibb képződménye, *Földtani Közlöny*, 39, 401-402
- SOMLAI, J., TARJÁN, S., KANYÁR, B. (2000): “A bomlás virágai” Radioaktív sugárzások és környezetünk, *Energia Klub Környezetvédelmi Egyesület*, Budapest, 40
- SOMLAI, J., GORJÁNÁ CZ, Z., VÁRHEGYI, A., KOVÁCS, T. (2006): Radon concentration in houses over a closed Hungarian uranium mine, *Science of the total Environment*, 367, 653-665
- SOMLAI, J., KÁVÁSI, N., SZABÓ, T., VÁRHEGYI, A., KOVÁCS, T. (2007): The function of radon in curing respiratory diseases in the therapeutic cave of Tapolca, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 273, 363–370
- SOMLAI, J., SZEILER, G., SZABÓ, P., VÁRHEGYI, A., TOKONAMI, S., ISHIKAWA, T., SORIMACHI, A., YOSHINAGA, S., KOVÁCS, T. (2008): Radiation dose of workers originating from radon in the show Cave of Tapolca, Hungary, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*
- SOMLAI, J., HAKL, J., KÁVÁSI, N., SZEILER, G., SZABÓ, P., KOVÁCS, T. (2011): Annual average radon concentration in the show caves of Hungary, *J Radioanal Nucl Chem*, 287, 427–433
- SOMOGYI, G., PARIPÁS, B., VARGA, ZS. (1983): Measurement of radon, radon daughters and thoron concentrations by multi-detector devices. *The Nucleus*, 20(3-4), 51-55

SPERRIN, M., GILLMORE, G., DENMAN, T (2001): Radon concentration variations in a Mendip cave cluster, *Environmental Management and Health*, 12, 476 - 482

SUBOSITS, J. (2009): Korai beton műtárgyak anyagának vizsgálata és környezeti ásványtani értékelése, diplomamunka, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Természettudományi Kar, Ásványtani Tanszék, p. 79

SURÁNYI, G., DOMBRÁDI, E., LEÉL-ÖSSY, SZ. (2010): Contributions of geophysical techniques to the exploration of the Molnár János Cave (Budapest, Hungary), *ACTA CARSOLOGICA* 39/3, 565–576

SURBECK, H. (1992): Nature and extent of Ra-226 anomaly in the Western Swiss Jura Mountains In: *Proc. Of the 1992 Int. Symp. On Radon and Radon Reduction Technology*, Sept, 21-25, Minneapolis MN, EPA-600/R-93-196202, 8-19

SZÉKELY, K. (2000): Barlangvédelem és hasznosítás in Dr. Korpás László Milleniumi Barlangnap Budapest, a barlangok fővárosa, Magyar Karszt- és Barlangkutató Társulat a Milleniumi Kormánybiztosítási Hivatal támogatásával, 65

SZERBIN, P. (1994): Radon a Rudas-fürdő légtérében, *Fizikai Szemle*, 6, 241

TAKÁCS-BOLNER, K., KRAUS, S. (1989): A melegvizes eredetű barlangok kutatásának eredményei (Results of research into caves with thermal water origins). – *Karszt és Barlang*, I–II, pp. 61–66. (InHungarian)

TAKÁCSNÉ BOLNER, K. (2000): Pál-völgyi-barlang, Duna-Ipoly Nemzeti Park Igazgatóság, ISBN 963 86466 59, p. 79

TANNER, A. B. (1980): Radon migration in the ground: supplementary review. In: Nazaroff, W. W. and Nero, A. V. Jr. (1988): *Radon and its decay products in indoor air*, John Wiley&Sons, New York, p. 518

TANNER, A.B. (1964): Radon migration in the ground: A review, in *The natural radiation environment*, J.A.S. Adams and W.M. Lowder eds. University of Chicago Press, pp.161-190 (1964).

TAYA, A., MORGAN, A., BAKER, S. T., HUMPHREYS, J. A. H., BISON, M., COLLIER, C. G. (1994): Changes in the rat lung after exposure to radon and its progeny: Effects on incorporation of bromodeoxyuridine in epithelial cells and on the incidence of nuclear aberrations in alveolar macrophages, *Radiat. Res.*, 139, 170-177

TAYLOR, S. R., MCLEAN, S. M. (1995): The geochemical evolution of the continental crust. – *Reviews of the geophysics*, 33, 241-265.

TÓTH, Á. (1983): A lakosság természetes sugárterhelése, A sugárvédelem újabb eredményei 1. kötet (szerkesztő: Fehér István), Akadémiai Kiadó, Budapest, p. 222

TÓTH, E., SELMECZI, D., PAPP, G., SZALAI, S. (1998): Lakótéri radon hosszú távú változásai, *Fizikai Szemle*, 1, 12-15

TRÁSY, B. (2010): A Molnár János-barlang és környezetének bemutatása, vízének vizsgálata archív és recens adatok alapján – Szakdolgozat, ELTE Általános és Alkalmazott Földtani Tanszék. 41p.

UNSCEAR, (2000): Sources and Effects of Ionizing Radiation—United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly with Scientific Annexes, United Nations, New York

UNSCEAR, (2008): Sources and Effects of Ionizing Radiation—United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. UNSCEAR 2008, Report to the General Assembly with Scientific Annexes, Volume I.

VÁRHEGYI, A. (1992): A radontranszport geogáz mikrobuborékos modellje, ezen alapuló kutatómódszer és monitoring, Kandidátusi értekezés, Pécs

VÁRHEGYI, A., SOMLAI, J. (2006): Radon helyzet néhány magyarországi bányában in Somlai J., Kovács T. (eds) III. Radon Fórum Kiadványa, Pannon Egyetemi Kiadó, Veszprém

VÍGH, T. (2011): Föld alatti bányauzem radiológiai vizsgálata a Mangán Kft. Példáján, doktori (PhD) értekezés, Pannon Egyetem, Radiokémiai és Radioökológiai Intézet, Veszprém, 137

VIRÁG, M., KÁLMÁNFINÉ, AST H., KARDOS, A., MINDSZENTY, A., LEÉL-ÖSSY, SZ., TIMÁR, G. (2011): Budai barlangok és travertínó szintek vizsgálata térinformatikai módszerekkel. Karsztféjlődés XIV., Szombathely, p.32.

WEIN, GY. (1977): A Budai-hegység tektonikája, A Magyar Állami Földtani Intézet alkalmi kiadványa, p. 76

WHO Handbook on indoor radon, A public health perspective, eds.: Zeeb, H.; Shannoun, F., (2009), ISBN 978 92 4 154767

WILKENING, M. H. & WATKINS, D. E. (1976): Air exchange and ^{222}Rn concentrations in the Carlsbad caverns, Health Physics, 31, 139-145

YARBOROUGH, K. A. (1978): Investigation of radon and thoron produced radiation in the National Park Service caves, The Natural Radiation Environment-III, Houston, Texas, The Book of Summaries, 208-212

Egyéb hivatkozások:

16/2000. (VI. 8.) EüM rendelet, az atomenergiáról szóló 1996. évi CXVI. törvény egyes rendelkezéseinek végrehajtásáról

Bekey Imre Barlangkutató Csoport évi jelentések 1990-1997

Természetvédelmi Hivatal Barlangtani Osztálya: Barlangnyilvántartás, Adattár

NuDat2.5, <http://www.nndc.bnl.gov/nudat2/> (2012.07.26. 21:43)

ludens.elte.hu/~akos/sflab (2012.07.26. 21:43)